МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Радиофизический факультет

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Учебно-методическое пособие

Томск
2013

ОДОБРЕНО кафедрой квантовой электроники и фотоники
Зав. кафедрой, профессор А.В. Войцеховский

РАССМОТРЕНО и УТВЕРЖДЕНО методической комиссией радиофизического факультета
Председатель комиссии, профессор А.П. Коханенко

В настоящем учебно-методическом пособии представлены физические основы возможности использования оптических волокон (ОВ) в современных линиях связи. Рассмотрены теоретические и практические вопросы, связанные с влиянием свойств ОВ на параметры волоконно-оптических линий связи. Приведены основные механизмы определяющие затухание и дисперсию в ОВ, а также методы их измерения. Подробно описаны окна прозрачности кварцевых волокон и нелинейные эффекты, возникающие в ОВ при передачи сигналов.

Кроме этого в пособии приведено описание четырех экспериментальных лабораторных работ, позволяющих студентам практически познакомиться с основными параметрами ОВ.

Пособие предназначено для студентов направлений подготовки «Фотоника и оптоинформатика» (200700), «Оптотехника» (200400) и специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» (210601) радиофизического факультета, а также может быть рекомендовано студентам других физических, радиофизических и радиотехнических специальностей.

СОСТАВИТЕЛИ:
д-р физ.-мат. наук, профессор КЭиФ — А.П. Коханенко
аспирант кафедры КЭиФ — Ю.В. Маслова

Содержание

1 Свойства оптических волокон

1.1 Полное внутреннее отражение

Передача света по оптическому волокну основана на явлении полного внутреннего отражения света от границы раздела – сердцевина-оболочка, с различными показателями преломления [1]. Для реализации данного явления в оптическом волокне показатель преломления сердцевины (n_1) всегда больше чем показатель преломления оболочки (n_2). Следует отметить, что явление полного внутреннего отражения наблюдается только в случае, если световой луч падает под углом, равным или большим угла полного внутреннего отражения. Угол полного внутреннего отражения (θ_n) в свою очередь – это угол между падающим лучом и нормалью к поверхности в точке падения луча.

Пусть абсолютный показатель преломления первой среды больше, чем абсолютный показатель преломления второй среды.

$$n_1 > n_2 \qquad (1.1),$$

то есть первая среда оптически более плотная.
Здесь абсолютные показатели сред соответственно равны:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, n_2 = \frac{c}{v_2} \qquad (1.2)$$

Тогда, если направить луч света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, то по мере увеличения угла падения, преломленный луч будет приближаться к границе раздела двух сред (рис.1), затем пойдет по границе раздела (рис. 2), а при дальнейшем увеличении угла падения преломленный луч исчезнет, т.е. падающий луч будет полностью отражаться от границы раздела двух сред (рис. 3).

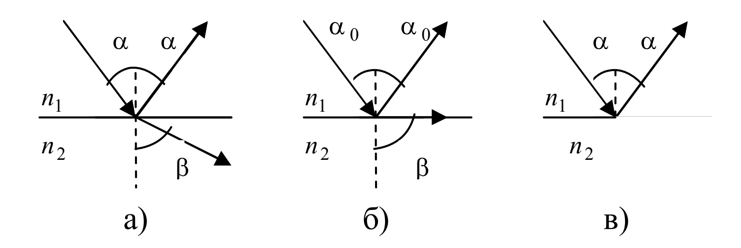


Рис. 1. Полное внутреннее отражение

Предельный угол (альфа нулевое) – это угол, которому соответствует угол преломления 90 градусов.

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n} \tag{1.3}$$

Для вычисления этого угла необходимо вспомнить закон Снеллиуса:

$$\alpha_0 = \arcsin(n_1 / n_2) \tag{1.4}$$

1.2 Числовая апертура

Важным параметром, характеризующим волокно, является числовая апертура NA (рис.2). Она связана с максимальным углом θ_A вводимого в волокно излучения из свободного пространства (n_0), при котором свет испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волокну с формулой

$$NA = n_0 \sin \theta_A \tag{1.5}$$

Фирмы – изготовители волокна, экспериментально измеряют угол θ_A и указывают соответствующее значение числовой апертуры для каждого поставляемого типа волокна. Для волокна со

ступенчатым профилем легко получить значение числовой апертуры, выраженное через показатели преломления

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \qquad (1.6)$$

Для градиентного волокна используется понятие локальной числовой апертуры

$$NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2} \quad , \qquad (1.7)$$

значение которой максимально на оси и падает до 0 на границе сердцевины и оболочки.

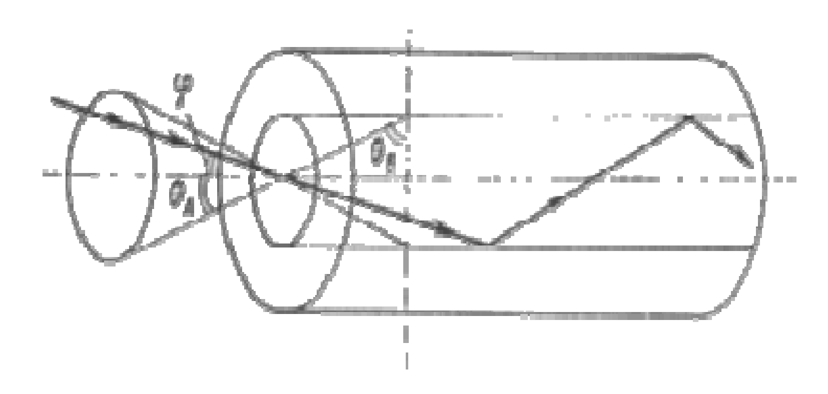


Рис. 2. Числовая апертура

1.3 Моды колебаний и нормированная частота

Свет как электромагнитная волна взаимодействует с веществом среды. В стекле свет взаимодействует с молекулами, которые электрически изотропны. Падающий свет - первичная волна, заставляет колебаться заряженные частицы - электроны, а значит, и молекулы в целом, создавая вторичные волны той же частоты, которые (по направлению) совпадают с первичной волной, ввиду электрической изотропности молекул.

В оптически однородной и изотропной среде в результате интерференции (наложения) первичной и вторичных волн образуется проходящая волна, фазовая скорость которой $v_{ф}$ зависит от частоты. Электрические и магнитные свойства

вещества световода, определяющие его взаимодействие со световой волной, характеризуются относительными диэлектрической и магнитной проницаемостями e, m и удельной проводимостью. Фазовая скорость волны при этом определяется соотношением [2]:

$$\nu_{ф} = c / \sqrt{(\varepsilon\mu)} = c / n(\omega), \qquad (1.8)$$

где с - скорость света в вакууме, а $n(\omega)$ - показатель преломления среды, зависящий от частоты. Из (1.8) видно, что фазовая скорость обратно пропорциональна показателю преломления среды n, который собственно и зависит от частоты.

На уровне электромагнитного взаимодействия с молекулами учитываются пространственные электрические **E** и магнитные **H** поля и явления поляризации (см. ниже) как электрической **P**, так и магнитной **B**, допускающие колебания соответствующих векторов (**E**, **H**) только в определенных плоскостях, что приводит к появлению в световоде многих (число это конечно) типов колебаний, или мод (аналогично тому, как в СВЧ-волноводе), учитывая, соблюдение "волноводных" условий распространения - длина волны света λ_c в оптоволокне имеет порядок 1 мкм, а диаметр световода d_c - 10-100 мкм (λ_c << d_c). Типы колебаний - моды - определяются решениями системы уравнений Максвелла.

При этом световод можно представить идеальным цилиндром с продольной осью z (точка z_o считается началом световода), оси x и y в поперечной (xy) плоскости образуют горизонтальную (xz) и вертикальную (xz) плоскости. В этой системе существуют 4 класса волн (**E** и **H** ортогональны) [2]:

- поперечные T: $E_z = H_z = 0$; $E = E_y$; $H = H_x$
- электрические E: $E_z \neq 0$, $H_z \neq 0$; $E = (E_y, E_z)$ - распространяются в плоскости (yz); $H = H_x$
- магнитные H: $H_z \neq O$, $E_z = 0$; $H = (H_x, H_z)$ - распространяются в плоскости (xz); $E = E_z$
- смешанные EH или HE: $E_z \neq O$, $H_z \neq 0$; $E = (E_y, E_z)$, $H = (H_x, H_z)$ - распространяются в плоскостях (xz) и (yz)

По режиму использования волоконные световоды делятся на многомодовые и одномодовые. Достоинством одномодовых световодов является отсутствие межмодовой дисперсии и

соответственно высокая пропускная способность световодного тракта. Одномодовый режим реализуется, если нормированная частота [2]

$$V = \frac{2\pi\alpha}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \le 2,405 \tag{1.9}$$

Число мод определяется формулой

$$N = \left(\frac{2\pi\alpha}{\lambda}n_1\right)^2 \Delta , \tag{1.10}$$

где

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} . \tag{1.11}$$

Из формулы видно, что чем толще сердцевина, тем большее число мод распространяется по волоконному световоду. В настоящее время для магистральных линий связи используют одномодовые волокна. Для передачи информации на короткие расстояния чаще применяются многомодовые волоконные световоды с диаметром сердцевины 50 мкм. Это связано с тем, что имеются некоторые технические трудности при производстве и дальнейшем эксплуатировании одномодовых волокон (диаметр сердцевины 5-8 мкм). Однако данные трудности можно преодолеть путем использования многослойных световодов, а также за счет треугольного профиля показателя преломления типа W, при котором представляется возможным сохранить одномодовый режим в диаметре сердцевины в 20-30 мкм.

Принимая скорость распространения в сердцевине $V = c / n_1$, время задержки будет определятmся как [2]

$$\Delta T = \frac{Ln_1^2}{cn_2}\Delta , \tag{1.12}$$

где L – длина волокна; n_1 – показатель преломления сердцевины волокна; n_2 – показатель преломления оболочки; $\Delta = \left(n_1 - n_2\right) / n_1$.

Свяжем битову скорость передачи B с временем задержки сигнала. Временной битовый период равен

$$T = 1 / B . \tag{1.13}$$

Необходимое условие

$$B\Delta T < 1 . \tag{1.14}$$

В результате

$$BL < \frac{n_2}{n_1^2}\frac{c}{\Delta}. \qquad (1.15)$$

Анализируя полученные соотношения, можно отметить, что чем толще сердцевина световода и чем больше отличается n_1 и n_2, тем больше критическая длина волны и соответственно ниже критическая частота волоконного световода. Из формул видно также, что при равенстве оптических характеристик, в первую очередь диэлектрической проницаемости сердечника и оболочки, т.е. при $n_1 = n_2$ критическая длина волны $\lambda_0 = 0$, а критическая частота $f_0 = \infty$, и передача сигнала по такому световоду невозможна. Это имеет свое логическое обоснование: при отсутствии границы оптических отражений световод перестает действовать как направляющая система передачи [2].

1.4 Окна прозрачности

Для передачи оптических сигналов может быть использован широкий участок спектра, где потери в волокнах достаточно малы. Его принято разбивать на более мелкие участки – рабочие диапазоны или окна прозрачности. Первоначально под окнами прозрачности понимали участки длин волн вблизи узких локальных минимумов в зависимости потерь от длины волны: (рис.3) 850 нм, 1310 нм, 1550 нм.

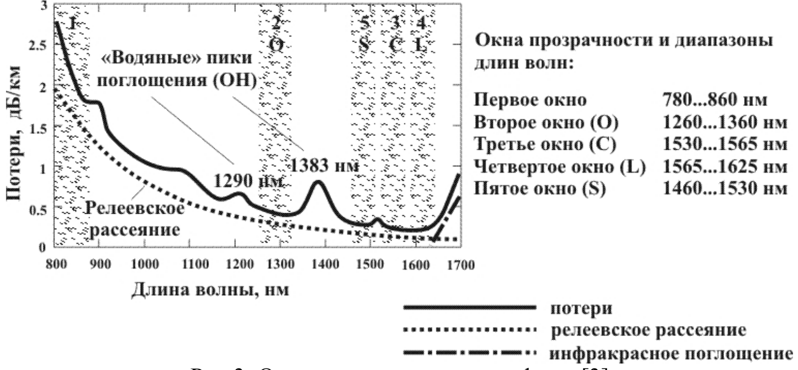


Рис.3. Окна прозрачности атмосферы [3]

Постепенно, с развитием технологии очистки кварцевого стекла стала доступна вся область малых потерь от 1260 нм до 1675 нм [3].

Первое окно прозрачности использовалось в 70-х годах XX века в первых линиях связи с использованием многомодовых волокон. В то время источники излучения на полупроводниковой основе выпускались только для длины волны 850 нм. В настоящее время данное окно в связи с большими потерями в волокнах используется в основном для локальных вычислительных сетей.

Второе окно прозрачности начали использовать в 80-х годах, в эпоху развития источников излучения на базе тройных и четвертных гетероструктур, в данное время оно используется в городских и зоновых линиях.

Третье окно стало осваиваться в начале 90-х годов. В него попадают одновременно и полоса усиления (для волоконного усилителя, легированного эрбием) и абсолютный минимум поглощения в кварцевом волокне. Это окно наиболее широко используется в магистральных линиях (например в системах Ростелекома и др. крупных операторов связи).

В последние годы в связи с развитием систем мультиплексирования каналов по длинам волн вызывают интерес третье и прилегающие к нему четвертое и пятое окна прозрачности. В зарубежной литературе диапазоны длин волн, соответствующие этим трем окнам, получили специальные наименования: третье окно (C) стандартный диапазон (Conventional band), четвертое окно – (L) длинноволновый диапазон (Long band), а пятое окно – (S)коротковолновый диапазон (Shot band) (рис.3).

В таблице 1 представлены новые спектральные диапазоны в интервале длин волн 1260 – 1675 нм, утвержденные Международным союзом телекоммуникаций [3].

Таблица 1 Спектральные диапазоны окон прозрачности

O – диапазон	1260-1360 нм	Основной (Original)
E – диапазон	1360-1460 нм	Расширенный (Extended)
S – диапазон	1460-1530 нм	Коротковолновой (Shot wavelength)
C - диапазон	1530-1565 нм	Стандартный (Conventional)
L - диапазон	1565-1625 нм	Длинноволновой (Long wavelength)
U - диапазон	1625-1675 нм	Сверхдлинный (Ultra-long wavelength)

1.5 Нелинейные эффекты в оптических волокнах

Отклик любого диэлектрика на световое воздействие становится нелинейным в сильном электромагнитном поле, и оптические волоконные световоды не составляют исключение. С появлением последних разработок современных систем передачи информации по оптическим волокнам нелинейные эффекты стали одним из основных факторов, ограничивающих длину ретрансляционного участка волоконных линий передачи и их пропускную способность.

Как уже было сказано, нелинейные эффекты проявляются только при достаточно большой мощности света. Первоначально величина мощности вводимого в волокно света была невелика (около 17 дБм), сегодня же некоторые фирмы используют волокна в которых уровень мощности достигает 30 дБм, в этом случае взаимодействие света со средой уже нелинейно зависит от мощности света и этот вклад быстро увеличивается по мере роста величины мощности.

По своим нелинейным свойствам кварцевое стекло существенно уступает традиционным нелинейным оптическим материалам. Однако эффективность нелинейных эффектов определяется не только нелинейными коэффициентами, но и произведением плотности мощности $P/A_{эфф}$ (интенсивности) на длину взаимодействия $L_{вз}$ [2]:

$$M - PL_{вз} / A_{эфф} \qquad (1.16)$$

В объемной среде длина взаимодействия $L_{вз}$ ограничена из-за дифракционной расходимости света величиной порядка $A_{эфф} / \lambda$ (релеевское расстояние):

$$L_{вз} = A_{эфф} / \lambda \qquad (1.17)$$

Поэтому в объемной среде коэффициент М не зависит от степени концентрации света и примерно равен:

$$M_{об} = P / \pi\lambda \, . \qquad (1.18)$$

Оптические волокна обладают двумя специфическими свойствами, которые обуславливают высокую эффективность протекания в них нелинейных процессов. Во-первых свет сконцентрирован в малой площади вблизи вблизи сердцевины

оптического волокна. Во-вторых, такая высокая концентрация света сохраняется на всей многоколометровой длине волокна [2].

Длина взаимодействия света со средой оптического волокна ограничена уменьшением интенсивности света из-за потерь и, поэтому, вносит существенный вклад в общий нелинейный эффект только на начальном участке. Соответственно эффективная длина этого участка будет равна [2]:

$$L_{эфф} = \left[1 - \exp\left(-\alpha L\right)\right] / \alpha\,, \qquad (1.19)$$

где L – длина волокна, α – потери в волокне.

Ситуация с возникновением нелинейных эффектов значительно усугубляется в системах ВОЛС с оптическими усилителями (ОУ), которые используются для обеспечения большей длины секции, а также в высокоплотных системах DWDM, использующих источники интенсивного лазерного излучения. Наиболее явно проявляются нелинейные эффекты низших порядков [1]:

- *нелинейное преломление* – явление, при котором показатель преломления зависит от интенсивности электрического поля E;
- *вынужденное неупругое рассеяние* – явление, при котором оптическая волна передает часть своей энергии нелинейной среде в результате взаимодействия с молекулами или частицами этой среды;
- *модуляционная неустойчивость* – явление модуляции стационарного волнового состояния под действием нелинейных и дисперсионных эффектов;
- *параметрические процессы* – явления, вызванные взаимодействием оптических волн с электронами внешних оболочек (*четырехволновое смешение* ЧВС (FWM), *генерация гармоник* и *параметрическое усиление*).

Нелинейное преломление, ФСМ и ФКМ

Зависимость показателя преломления n от $|E|^2$ приводит к таким нелинейным эффектам как *фазовая самомодуляция* (ФСМ) и *фазовая кросс-модуляция* (ФКМ):

- ФСМ обусловлена нелинейным набегом фазы, оптическое поле приобретает при распространении в ОВ, причем он растет с увеличением длины распространения

2 Затухание излучения в оптических волокнах

Затухание является одним их важнейших параметров оптического волокна. Чем меньше затухание распространяемого сигнала в волокне, тем больше расстояние передачи сигнала.

По мере распространения света в оптической среде он ослабевает, что носит название затухания ОВ. Затухание в оптическом волокне – это мера ослабления оптической мощности, распространяемой вдоль ОВ между двумя его поперечными сечениями на данной длине волны. Затухание в ОВ выражается в дБ. Коэффициент затухания в ОВ – это величина затухания на единице длины волокна и выражается в дБ/км.

Коэффициент затухания в ОВ обуславливается следующими факторами (рис. 4):

- потери за счет рэлеевского рассеяния;
- рассеяние на дефектах волокна;
- собственное поглощение;
- примесное поглощение;
- кабельные потери;
- потери на макро и микроизгибах.

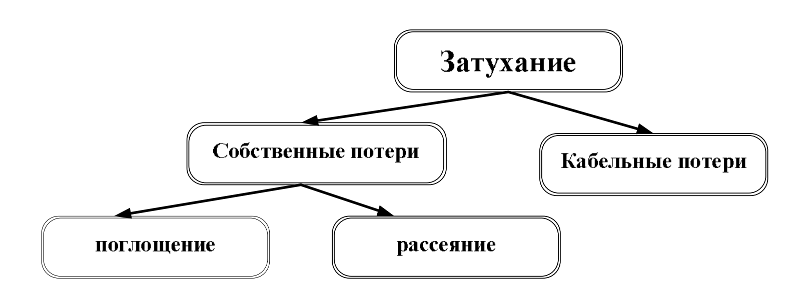


Рис.4. Виды затухания в волокне

Собственное внутренне поглощение материала является потерями, вызванными только чистым кремнием, когда как внешние потери – это потери, вызванные наличием примесей в волокне.

Затухание ОВ по своей природе зависит от длины волны излучения, вводимого в волокно, поэтому передача сигналов по волокну в основном осуществляется в диапазонах, где кварц имеет повышенную прозрачность (окна прозрачности): 850, 1300, 1490,

1550 нм. На рис. 5 приводится общий вид спектральной зависимости собственных потерь для современного оптического волокна.

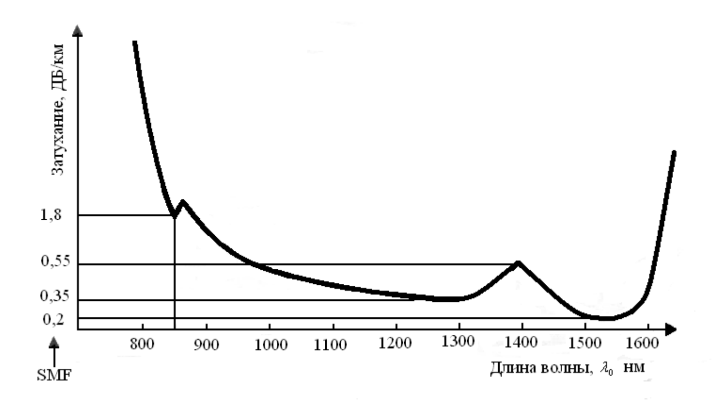


Рис.5. Собственные потери в ОВ с гидроксильным пиком OH

Полное затухание определяется коэффициентом затухания α [дБ/км], который в общем виде равен: [32]

$$\alpha = \alpha_п + \alpha_{рэл} + \alpha_{пр} + \alpha_к, \tag{2.1}$$

где $\alpha_п$ – коэффициент затухания, обусловленный потерями на поглощение световой энергии;

$\alpha_{рэл}$ – коэффициент затухания, обусловленный рэлеевским рассеиванием;

$\alpha_{пр}$ – коэффициент затухания, вызванный присутствующими в ОВ примесями;

$\alpha_к$ – дополнительные кабельные потери.

Рассмотрим подробнее составляющие затухания (рис. 6).

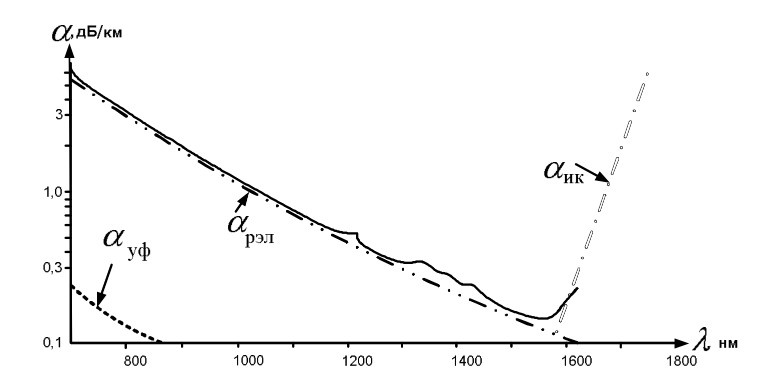


Рис.6. Факторы влияющие на затухание в ОВ без гидроксильного пика ОН (по материалам фирмы Corning Optical Fiber) [3]

Современные оптические волокна имеют очень небольшое количество микропримесей, поэтому величина внешнего поглощения минимальна и может не приниматься в расчет. Очень сильное собственное поглощение происходит в ультрафиолетовой части. Ультрафиолетовое поглощение расположено далеко от области, где эксплуатируются волоконные системы, так что их вклад незначителен. Ультрафиолетовое поглощение показано на рис. 6.

Пики собственного поглощения также имеются в инфракрасной области спектра. Для типичных составов стекол пики поглощения, расположенные между 7 мкм и 12 мкм, далеки от области, в которой работают волоконные системы. Как показано на рис. 6, коротковолновая граница этого механизма поглощения простирается вниз по спектру, приближаясь к области, где функционируют волоконные системы. Инфракрасное поглощение вносит малые потери в верхней части участка спектра, используемого для волоконной связи. Во втором и третьем окнах прозрачности в диапазоне длин волн 1,3-1,6 мкм потери, вызванные собственным поглощением, имеют порядок 0,03 дБ/км. [3]

2.1 Поглощение

Рассмотрим более подробно потери оптического излучения из-за поглощения света. Механизм поглощения оптического излучения в материале волоконного световода можно объяснить, используя

теорию электронных и атомных резонансов, которые вызывают поглощение мощности в окрестности резонансных частот. Для интересующих нас материалов это резонансы в ультрафиолетовой области спектра, связанные с электронными структурами атомов кристаллической решётки, и резонансы в инфракрасной области, обусловленные колебаниями самих атомов в решётке. Хотя эти резонансы и лежат весьма далеко от тех оптических частот, которые мы хотим использовать, однако они вызывают столь сильное поглощение, что хвосты их полос поглощения захватывают эту область при очень малом уровне потерь. На рис. 7 [4] приведена оценка потерь, создаваемых краями полос поглощения в кварцевом волокне, легированном германием.

Окно между краями ультрафиолетовой и инфракрасной полос поглощения должно составлять 1,5 мкм, однако оно уменьшается до 0,3 мкм, поскольку над ультрафиолетовым поглощением начинает преобладать другой фундаментальный механизм потерь, а именно – рэлеевское рассеяние.

Влияние края инфракрасной полосы поглощения становится значительным на длинах волн свыше 1,5 мкм. Создаваемые ими потери обусловлены наличием характерных периодов колебания в межатомных связях окислов, соответствующих следующим фундаментальным частотам: Si-O 9,0 мкм, Ge-O 11,0 мкм, P-O 8,0 мкм, B 7,3 мкм. С этой точки зрения германий должен быть самой благоприятной примесью из-за большей длины волны, соответствующей периоду колебаний связи Ge-O.

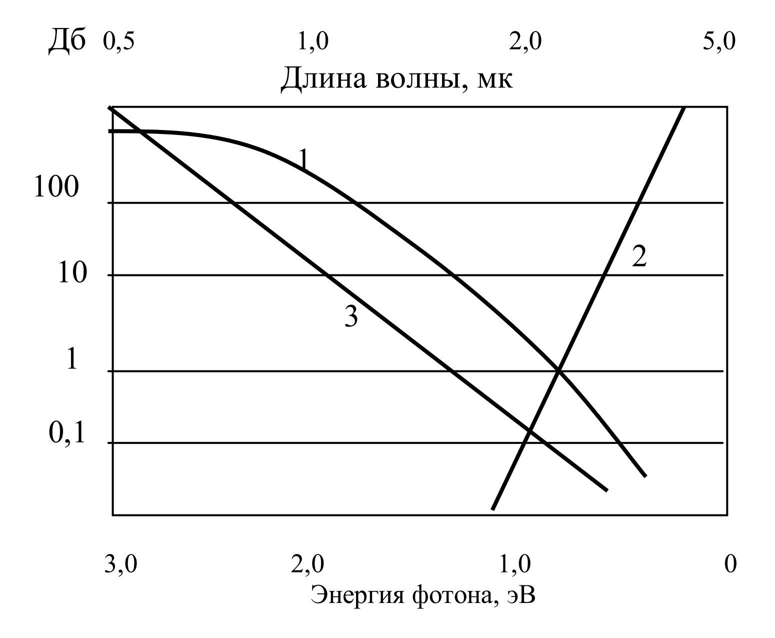


Рис. 7. Потери в кварцевом волокне, легированном германием:
1) рэлеевское рассеяние; 2) край ИК поглощения;
3) расчетный край УФ поглощения

Край полосы поглощения играет важную роль в материалах, используемых для изготовления оптических волокон. Однако эти материалы могут также содержать атомы и молекулы примесей, которые способны вызывать поглощение на интересующих нас длинах волн. Экспериментально установлено, что самыми вредными примесями являются пары воды и переходные металлы первой группы (ванадий, хром, магний, железо, кобальт и никель). В стекле металлы присутствуют в виде ионов, которые благодаря своей электронной структуре вызывают широкополосное поглощение на длинах волн, значения которых могут зависеть от степени окисления иона. Чтобы на длинах волн в области 1 мкм увеличение поглощения, обусловленное наличием указанных выше примесей, не превышало 1 дБ/км, концентрация примесей, по самым скромным оценкам, должна быть ниже 10^{-9} .

Поглощение, вызываемое наличием паров воды, обусловлено основным периодом колебаний межатомной связи О-Н.

Фундаментальная частота колебаний f_0 соответствует 2,73 мкм, однако она вызывает появление гармоник и комбинационных частот с изгибным резонансом связи Si-O на длине волны 12,5 мкм.

2.2 Рассеяние

По своей природе стекло является неупорядоченной структурой, в которой имеются микроскопические отклонения от средней плотности материала, а также локальные микроскопические изменения в составе. Каждое из указанных изменений приводит к флуктуациям показателя преломления, величина которых мала по сравнению с длиной волны оптического диапазона. Сказанное справедливо для любого стеклообразного материала, однако и при качественном изготовлении в нём наблюдается рассеяние света, известное как рэлеевское, приводящее к потерям в волокне (некоторая часть света может распространяться в обратном направлении). Измерение этого эффекта является полезным способом оценки потерь в волокне. Однако это рассеяние света существенно ограничивает возможности передачи сигналов в обоих направлениях. В самом деле, если видимый лазерный свет ввести в свёрнутое в спираль длинное волокно без защитной оболочки, то из-за рассеяния света эта спираль будет видна в тёмной комнате, причём интенсивность свечения будет уменьшаться с увеличением длины волокна.

Свой вклад в затухание ОВ вносит Рэлеевское рассеивание. Наличие этого типа потерь является внутренним, и вызван флуктуациями мгновенной плотности и вариациями концентрации молекул, за счет несовершенства внутренней структуры волокна: воздушных пузырьков, неоднородностей и трещин, или несовершенством направляющего волновода, вызванным общей нерегулярностью системы сердцевина-оболочка.

Подобные посторонние включения значительно влияют на возможность прохождения светового потока по правильной траектории, приводят к его отклонению и, как следствие, превышению угла преломления и выходу части светового луча через оболочку. Кроме того, наличие неоднородностей волокна приводит к отражению части светового потока в обратную сторону – обратное рассеивание (рис. 8).

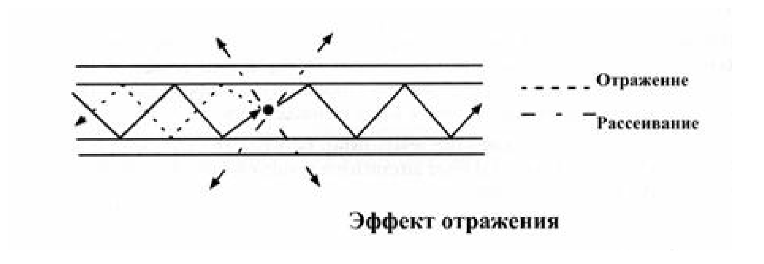


Рис. 8. Рэлеевское рассеивание [3]

Этот вид рассеяния определяет теоретическую границу, ниже которой затухание не может быть уменьшено и в современных ОВ является основным источником потерь в рабочих областях спектра (рис.6).

2.3 Потери на изгибах. Кабельные потери

Оптический кабель можно изгибать с относительно небольшим радиусом. Это облегчает выбор трассы и позволяет прокладывать ОК в весьма сложных условиях. Изгибы, связанные с прокладкой кабеля, носят, как правило, локальный характер, чаще всего ограничены углами 90° и чередуются с прямолинейными участками. Другой характер имеет изгиб, связанный со скруткой ОВ в кабеле, он регулярен и имеет постоянный радиус кривизны.

Изгибы ОВ вызывают увеличение коэффициентов связи между направляемыми модами, увеличивают их связь с полем излучения, меняют модовое распределение и в результате приводят к дополнительным потерям. Потери отдельных мод в изогнутых световодах исследовались многими авторами. В.В. Шевченко предложил метод расчета потерь на излучение в слабоизогнутых ОВ в предположении о локальности процесса излучения в поперечном сечении и существовании близкой аналогии в излучении плоского и круглого волноводов. Этот метод применим в том случае, когда волна замедлена незначительно, потери на излучение в масштабе длины волны λ малы и поле поверхностной волны в поперечном сечении уменьшается медленно. Локальность процесса излучения заключается в следующем. Поле волны в любом поперечном сечении изогнутого ОВ считается идентичным полю прямолинейного волновода, тогда, начиная с некоторого расстояния r_0 с внешней стороны изгиба, фронт волны должен двигаться

быстрее, чем плоская волна в свободном пространстве. Поскольку это невозможно, то волна высвечивается с поверхности $r=r_0$, причем ее потери соответствуют той ее части мощности волны, которая в прямолинейном волноводе оказывается снаружи этой поверхности [5].

Д. Маркузе получил расчетные формулы для потерь на изгибе ОВ с малой нормированной разностью показателей преломления оболочки и сердцевины Δ и исследовал влияние эффекта смещения поля мод в изогнутом ОВ по сравнению с прямым. Семенов показал, что существенные потери на излучение имеют только моды с высокими граничными частотами, и малыми азимутальными номерами, практически только с $v \leq 10$. Только эти моды имеют достаточно протяженное поле вне сердечника и ОВ. Однако, доля мощности, переносимая этими модами, незначительна, поэтому рассчитанные таким образом потери представляют собой лишь небольшую долю полных потерь. Общий дополнительный коэффициент затухания на изгибе α_u определяется прежде всего увеличением коэффициентов связи между всеми направляемыми модами, в том числе и с вышеупомянутыми сильноизлучающими модами. Эту точку зрения подтверждают эксперименты, согласно которым потери на изгибах больше у ОВ, содержащих большее количество нерегулярностей, имеющих большой коэффициент рассеяния. Расчет потерь на изгибах проведем исходя их этих представлений, используя так же результаты Д. Глоге, определившего уменьшение предельных углов наклона лучей на изогнутом участке ОВ по сравнению с прямолинейным, что эквивалентно уменьшению нормированной разности показателей преломления Δ. Пусть известен предельный угол $\theta_{np}=\sqrt{2\Delta}$ для многомодового волокна со ступенчатым многомодовым волокном (СММВ) или градиентным многомодовом волокном (ГММВ) профилем показателя преломления (ППП). При изгибе оси радиусом R уменьшенный предельный угол для СММВ $\theta_{npR}=\theta_{np}(1-2a/(R\theta^2_{np}))$ и для ГММВ $\theta_{npR}=\theta_{np}(1-2a/(R\theta^2_{np}))^{1/2}$. Определим эквивалентную разность показателей преломления соотношением $\theta_{npR}=\sqrt{2\Delta_R}$. Тогда [5]

$$\Delta_R = \frac{\theta^2_{npR}}{2} = \Delta\left[1 - \frac{a}{(R\Delta)^q}\right] \tag{2.2}$$

где q=1 для СММВ и q=2 для ГММВ.

Дальнейший расчет для локального и регулярного изгибов различен. При переходе от прямого к изогнутому участку, направляющие свойства ОВ скачком уменьшаются и часть направляемых мод теряется (рис. 9).

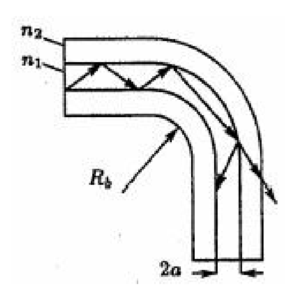


Рис. 9. При изгибе часть направляемых мод теряется [5]

На изгибе образуется неустановившееся модовое распределение с повышенным коэффициентом затухания; увеличивается так же коэффициент связи между модами, что вызывает дополнительное затухание. Все эти процессы изучены пока недостаточно, поэтому ограничимся здесь верхней оценкой величины потерь на изгибе. Будем считать, что на конце изогнутого участка снова наблюдается установившееся модовое распределение, но для уменьшенного Δ_R. Тогда потери на изгибе определяются соотношением телесных углов, ограничивающих все направляемые волны при двух разных Δ [5]:

$$A_{и} = -10\lg\frac{\theta_{npR}^2}{\theta_{np}^2} = -10\lg\frac{\Delta_R}{\Delta} = -10\lg\left(1-\frac{a}{R\Delta}\right)^q \quad . \quad (2.3)$$

В этом соотношении нет явной зависимости от угла изгиба и можно полагать, что вычисленные потери относятся также к нескольким следующим друг за другом изгибам. Потери по этой формуле завышены по двум причинам: модовое распределение к концу изгиба может еще не установиться, хотя увеличение связи между модами на изгибе должно сокращать длину установления; в начале прямолинейного участка, после перехода от Δ_R к Δ должно наблюдаться пониженное затухание [5].

Микроизгибы – искажения от прямолинейности оси ОВ, возникающие при его покрытии полимером, а также при всевозможных механических воздействиях других элементов

кабеля. Как правило, амплитуды микроизгибов составляют доли и единицы микрометров, а периоды – единицы миллиметров или сантиметров. Несмотря на столь незначительные отклонения от прямой, микроизгибы могут существенно увеличивать коэффициент затухания ОК, так как они существуют на всей его длине. Анализ влияния микроизгибов позволяет установить из допустимые значения и сформулировать требования к технологии изготовления световода и кабеля. Микроизгибы носят нерегулярный характер и как всякий случайный процесс описываются статистическими характеристиками (рис. 10).

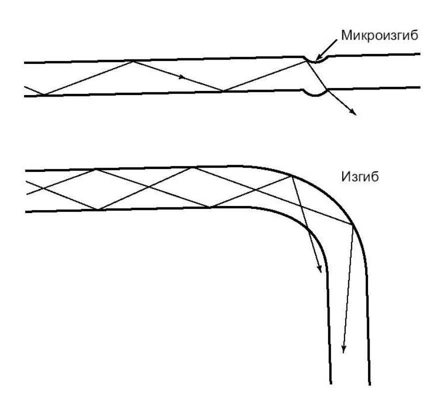


Рис. 10. Изгибы и микроизгибы

Дополнительные потери, определяемые деформацией ОВ в процессе изготовления кабеля, вызванной скруткой, изгибом, отклонением от прямолинейного расположения и термомеханическими воздействиями, имеющими место при наложении оболочек и покрытий на сердцевину волокна при изготовлении ОК, называют кабельными.

Проблемы в работе сети очень часто связаны с ошибками, сделанными при инсталляции или обслуживании оптической кабельной системы. Так, чрезмерный изгиб или сдавливание кабеля могут привести к тому, что часть световой энергии выйдет из волокна и произойдет существенное затухание сигнала. Это негативное явление имеет место даже в случае так называемых микроизгибов (microband), которые могут появиться, например, при сильном стягивании оптических коммутационных шнуров жгутом или когда сверху такого шнура будет проложен тяжелый медный кабель. Макроизгибы (macroband) являются следствием превышения

предела, установленного для минимального радиуса изгиба кабеля, и еще больше увеличивают затухание сигнала. Особо тщательно надо следить за тем, чтобы не допустить раздавливание волокна, которое может произойти, когда инсталлятор случайно наступит на кабель или зажмет его дверью монтажного шкафа. Внешне может быть вообще ничего не заметно (или видно лишь небольшое сплющивание оболочки кабеля), однако при этом под оболочкой волокно будет сильно повреждено, что значительно ухудшит характеристики канала связи (см. рис. 11). [5]

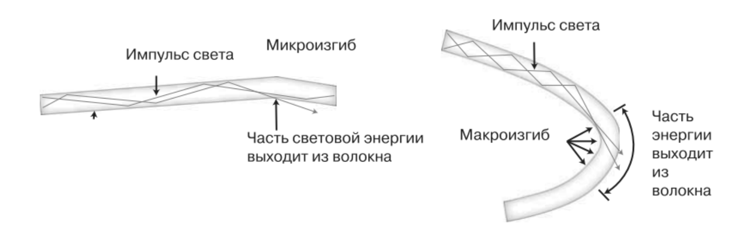


Рис. 11. – Микро- и макро изгибы оптического кабеля [5]

Реальный световод нерегулярен вследствие дефектов в технологии его изготовления, механических воздействий со стороны других элементов кабеля, особенностей трассы, наличия стыков между строительными длинами ОК, и т.п. Нерегулярности прежде всего изменяют модовый режим, увеличивают коэффициент затухания и изменяют искажение сигнала, причем эти проявления тесно связаны между собой.

В реальном ОВ, поступающем на кабельное производство, возможны следующие макроскопические нерегулярности: объемные вариации ПП в виде протяженных нитей или дискретных включений, например, воздушных пузырьков; непостоянство формы и размеров границы между сердцевиной и оболочкой, например, периодическое изменение диаметра сердцевины, эллиптичность его контура, эксцентриситет. Рассеянное излучение от макроскопических неоднородностей, в отличие от релеевского, имеет выраженную направленность в сторону распространения волны. Поэтому измерение диаграммы направленности излучения с боковой поверхности ОВ также позволяет, хотя бы в первом приближении, разделить эти две компоненты потерь, если она не меняется вдоль ОВ, не вызывает дополнительного затухания.

Эксцентриситет сердцевины также не влияет на величину α, однако является весьма важным при стыковке двух ОВ, так как приводит к несовпадению сечений сердцевин на стыках.

Иногда макроскопические неоднородности распределяются неравномерно вдоль ОВ; излучение от их скопления можно тогда даже обнаружить невооруженным глазом при возбуждении He-Ne лазером. Оценка величины нерегулярностей этого типа возможна при измерениях по длине ОВ равномерности интенсивности излучения, коэффициента затухания либо интенсивности обратного рассеяния. В таких экспериментах можно изогнуть ОВ либо другим способом предотвратить длительное распространение рассеянной сердцевиной энергии вдоль оболочки.

2.4 Методы измерения потерь излучения

Оптические потери в волоконных световодах определяются тремя методами: «обрыва», «двух точек», «обратного рассеяния», т.е. методом рефлектометрии или оптической локации.

Схема установки для измерения методом обрыва потерь в волоконном световоде при фиксированном значении длины волны представлена на рис. 12.

Используемый при измерениях оптический сигнал может быть модулирован для того, чтобы выделить его на фоне помех. При модулированном сигнале система фотодетектирования должна быть синхронизована с источником излучения. Методика измерения следующая:

– испытуемый образец волокна присоединяют к измерительной системе, содержащей фильтр мод, и записывают значение мощности P_2 излучения на выходе;

– при тех же условиях ввода излучения в волокно разрезают образец на расстоянии приблизительно 2 м от входного торца и регистрируют значение P_1 мощности излучения, прошедшего это расстояние;

– определяют потери A, дБ.

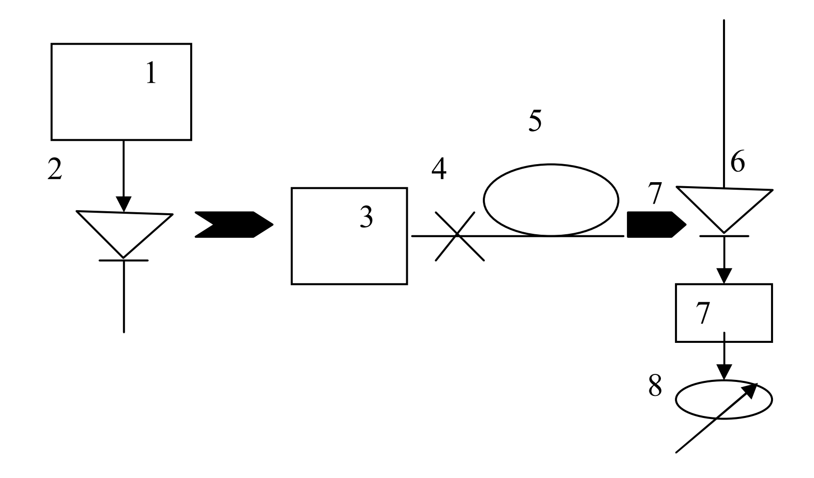


Рис. 12. Экспериментальная установка для измерения потерь в волоконном световоде методом обрыва

1–источник питания, 2–лазерный диод, 3–модовый фильтр, 4–место «обрыва», 5–световод, 6–детектор, 7–процессор, 8–регистрирущий прибор.

При измерении потерь в волокне методом «двух точек » сначала определяют мощность P_1 излучения, которое должно быть введено в испытуемый образец, а затем юстируют торцы образца волокна в соединениях его с источником излучения и фотодетектором. Далее фиксируют мощность P_2 на выходе и вычисляют значение потерь А, дБ. Метод «обратного рассеяния» (рефлектометрия) применяется для измерения оптических потерь в волоконных световодах, но чаще его используют для определения местонахождения обрывов волокон в световодных линиях и участков стыков, изгибов. В некоторых случаях этот метод используют для определения длины отрезка волокна.

При рефлектометрии импульсы света от источника вводят во входной торец световода. Каждый импульс распространяется по волокну. За счёт флуктуаций показателя преломления на участках, меньших длины волны излучения, в материале волокна возникает рэлеевское рассеяние. Продольная составляющая этого рассеяния превращается в моды, возвращающиеся к входному торцу волокна, где расположен источник света. Измеряя мощность отражённого излучения, можно судить о величине потерь на длину пути прохождения импульса. При определении оптических потерь в различных участках волокна рефлектометр осуществляет активную

световую локацию в импульсном режиме. Расстояние между входным торцом и какой-либо точкой в световоде, из которой возвращается назад эхо-сигнал, определяется по длительности запаздывания этого сигнала, как при обычной радиолокации. График, на котором по оси абсцисс отложены значения расстояния L, а по оси ординат – мощность эхо-сигнала, называется рефлектограммой. По рефлектограмме можно рассчитать значение потерь оптической мощности ни любом участке испытуемого образца волокна, определить местонахождение повреждений волокна, разъёмных и неразъёмных соединений и т.п.

3 Дисперсия

При передаче полезного информационного сигнала по оптическому волокну важную роль играет не только затухание оптической мощности по мере распространения сигнала, но и искажение формы сигнала за счет дисперсии различного рода. Дисперсия приводит к расплыванию (уширению) сигнала и при достаточно большом уширении импульсные сигналы начинают перекрываться, что приводит к невозможности их выделения при приеме.

Дисперсия оптического волокна – уширение оптических импульсов – имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе ($\tau_{вых}$) и входе ($\tau_{вх}$) оптического волокна длины L по формуле [6]:

$$\tau = \sqrt{\tau_{вых}^2 - \tau_{вх}^2} \qquad (3.1)$$

Дисперсия нормируется в расчете на 1 км, и измеряется в пс/км. Дисперсия характеризуется тремя основными факторами [6]:

- различием скоростей распространения направляемых мод (межмодовая дисперсия);
- направляющими свойствами световодной структуры (волноводная дисперсия);
- свойствами материала оптического волокна (материальная дисперсия).

Результирующая дисперсия определяется из формулы

$$\tau = \sqrt{\tau_{мм}^2 + \tau_{хр}^2} = \sqrt{\tau_{мм}^2 + (\tau_в + \tau_{мат})^2}, \qquad (3.2)$$

где $\tau_{мм}$ и $\tau_{хр}=\tau_в + \tau_{мат}$ – расширение импульса на выходе ОВ относительно импульса, поданного на его вход, имеющее место в результате межмодовой и хроматической дисперсии соответственно.

3.1 Виды дисперсии

3.1.1 Межмодовая дисперсия

Межмодовая дисперсия возникает вследствие различной скорости распространения мод, и имеет место только в многомодовом волокне. В многомодовом световоде, в котором может распространяться большое число мод, проходящий по нему импульс размывается, так как групповые скорости мод различны. На выход световода приходят большое количество мод, у каждой из которых своя скорость распространения. Поэтому выходной сигнал размыт во времени [6].

Возникновение межмодовой дисперсии поясняется на рис. 3.1. В оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления излучение распространяется по зигзагообразным, а в оптическом волокне с плавным профилем показателя преломления – по спиральным траекториям.

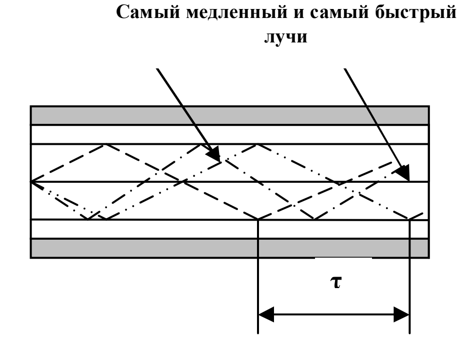


Рис. 13. Возникновение межмодовой дисперсии

Периферийные лучи распространяются по более длинной траектории, чем лучи центральной области. Это приводит к различию групповых скоростей различных мод. Для оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления при $n_c - n_{об} = 0{,}01$ временная задержка между крайними по траектории лучами составляет порядка 25 нс/км, а для градиентного оптического волокна эта величина на два порядка меньше. Однако на практике для ступенчатых оптических волокон взаимодействие

различных мод и дифференциальные модовые потери приводят к уменьшению значений эффективной числовой апертуры и межмодовой дисперсии.

3.1.2 Хроматическая дисперсия

Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении, как в одномодовом, так и в многомодовом волокне. Однако наиболее отчётливо она проявляется в одномодовом волокне из-за отсутствия межмодовой дисперсии. Материальная дисперсия является характеристикой собственно материала сердцевины световода и соответствует объёмной среде (собственная фундаментальная характеристика материала, ограничивающая широкополосность оптического волокна для данного спектра излучения передаваемого сигнала). Волноводная дисперсия проявляется в волноводной среде, образованной, по крайней мере, двумя областями с разными показателями преломления (сердцевина и оболочка световода) [2].

Материальная дисперсия определяется электромагнитным взаимодействием световой волны со связанными электронами материала среды. Это взаимодействие зависит от длины волны. Возникновение материальной дисперсии обусловлено тем, что любой источник оптического излучения генерирует импульсы, имеющие непрерывный волновой спектр определённой ширины. Дисперсия материала обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны излучения [2].

Волноводная дисперсия. В волноводной среде значения эффективных показателей преломления для каждой моды, по её траектории, не совпадают. При этом появляется особая волноводная составляющая дисперсии, зависящая от величин материальной дисперсии сердцевины и оболочки световода, а также радиуса сердцевины, разности показателей преломления сердцевины и оболочки, числа оболочек. Волноводная дисперсия проявляется даже при отсутствии зависимости показателя преломления от длины волны и обусловлена влиянием геометрической структуры оптического волокна.

Действие волноводной дисперсии приводит к сдвигу длины волны нулевой дисперсии. Применение нескольких слоёв оболочки,

приводящее к изменению параметров волноводного тракта, позволяет сдвинуть длину волны нулевой дисперсии [2].

3.1.3. Поляризационная модовая дисперсия

Свет, распространяющийся в номинально одномодовом волокне, можно представить в виде суммы двух поляризационных мод. Каждая поляризационная мода распространяется параллельно оси волокна со своим значением фазовой и групповой скоростей. Фазовый фронт у волн плоский, а нормаль к плоскости фазового фронта параллельна оси волокна. Пространственное распределение полей у поляризационных мод волокна одинаковое (гауссово), и отличаются они только тем, что поляризованы ортогонально. На практике оптические волокна имеют не идеальную геометрию, что приводит к различной скорости распространения двух поляризационных мод и возникновению уширения (дисперсии) информационного сигнала (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

3.2. Зависимость дисперсии от типа волокна

Межмодовая дисперсия преобладает в многомодовых ОВ и обусловлена отличием времени прохождения мод по ОВ от его входа до выхода. Для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления скорость распространения электромагнитных волн с длиной волны λ одинакова и равна $v=c\cdot l\cdot n_1$, где с – скорость света, а l — длина волокна. В этом случае все лучи, падающие не торец ОВ под углами к его оси в пределах $0 < \theta < \theta_A$, достигают приемного устройства с некоторым временным сдвигом, что, естественно, приводит к увеличению длительности принимаемого импульса [2].

Межмодовая дисперсия градиентных ОВ, как правило, на порядок и более ниже, чем у ступенчатых волокон. Это обусловлено тем, что за счет уменьшений показателя преломления от оси ОВ к оболочке скорость распространения лучей вдоль их траекторий – так, на траекториях, близких к оси, она меньше, а удаленных – естественно, больше. Следовательно, лучи, распространяющиеся кратчайшими траекториями (ближе к оси), обладают меньшей скоростью, а лучи, распространяющиеся по более протя женным траекториям, имеют большую скорость. В результате время

распространения лучей выравнивается, и увеличение длительности импульса становится меньше. Так как межмодовая дисперсия не зависит от характеристик источника излучения, для многомодовых волокон ее оценивают по полосе пропускания ОВ *(МГц·км)* [2].

Согласно геометрической интерпретации распространения оптических лучей по ОВ, время распространения луча зависит от угла θ_n и определяется выражением

$$tg(\theta_n) = L \cdot n_1 / c \cdot \cos(\theta_n). \quad (3.3)$$

Так как минимальное время распространения оптического луча имеет место при $\theta=0$, а максимальное при $\theta=\theta_{кр}$, соответствующие им значения времени распространения можно записать как [2]:

$$\theta_{мин} = L \cdot n / c \quad \text{и} \quad t_{макс} = L \cdot n_1 / c \cdot \cos(\theta_{кр}), \quad (3.4)$$

откуда значение межмодовой дисперсии равно

$$\tau_{мм} = t_{макс} - t_{мин} = \frac{L}{c} n_1 \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = \frac{n_1 \cdot \Delta}{c} L \quad (3.5)$$

Из последнего выражения следует, что межмодовая дисперсия возрастает с увеличением длины волокна. Однако это справедливо только для идеального волокна, в котором взаимодействие между модами отсутствует. В реальных условиях наличие неоднородности и, кручение и изгиб волокна приводят к постоянным переходам энергии из одних мод в другие — *взаимодействию мод,* в связи с чем дисперсия становится пропорциональной $\sqrt{L}$. Это явление проявляется не сразу, а после определенного расстояния прохождения световой волны, которое носит название длины *установившейся связи мод.* Это значение принимается равным 5 - 7 км для ступенчатого волокна и 10 - 15 км для градиентного и установлено эмпирическим путем.

В градиентных многомодовых волокнах время распространения оптических лучей, как было показано выше, определяется законом изменения показателя преломления и при определенных условиях выравнивается, что естественно, влечет к уменьшению дисперсии. Так, при параболическом профиле показателя преломления q=*2* значение модовой дисперсии будет определяться выражением:

$$\tau_{мм} = \frac{L}{c}\frac{\Delta^2}{2}n_1, \tag{3.6}$$

а при $q_{опт} = \sqrt{2(1-2\Delta)}$ она достигает минимального значения, равного

$$\tau_{мм} = \frac{L}{c}\frac{\Delta^2}{8}n_1. \tag{3.7}$$

Отличие времени распространения каждой из направляемых мод, образующих сигнал, от частоты спектра источника оптического излучения приводит к возникновению так называемой *хроматической* (частотной) *дисперсии,* которая, в свою очередь, складывается из *внутримодовой (волноводной) дисперсии* и *материальной дисперсии.*

Первый тип дисперсии обусловлен направляющими свойствами сердцевины ОВ, а именно зависимостью групповой скорости моды от длины волны оптического излучения, что приводит к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра. Поэтому внутримодовая дисперсия в первую очередь определяется профилем показателя преломления ОВ и пропорциональна ширине спектра излучения источника Δλ, т. Е [2].

$$\tau_{в} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda), \tag{3.8}$$

где M(λ)-удельная внутримодовая дисперсия.

Второй тип дисперсии вызван зависимостью показателя преломления сердцевины от длины волны $n_1(\lambda)$, что, как и в предыдущем случае, приводит к различным скоростям распространения спектральных составляющих источника излучения. Возникающая при этом различная задержка частотных составляющих распространяющегося в ОВ излучения, определяет дисперсию материала, которая равна [6]

$$\tau_{мат} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda) = \frac{L\lambda}{c}\left|\frac{d^2 n_1(\lambda)}{d\lambda^2}\right|\Delta\lambda \cdot \tag{3.9}$$

Здесь следует отметить, что материальная дисперсия кварцевого ОВ при определенной частоте имеет нулевое значение, так как при длине волны λ=*1,28 мкм* она изменяет свой знак. Эта точка носит название точки *нулевой материальной дисперсии.* Очевидно, что, изменяя соотношение между модовой и материальной дисперсией, точку нулевой дисперсии можно перемещать в небольших пределах (рис. 8).

В нормальных условиях материальная дисперсия преобладает над волноводной, причем обе ее составляющие могут иметь противоположный знак и различаться характером зависимости от длины волны. В ряде случаев это позволяет оптимизировать профиль показателя преломления волокна путем минимизации суммарной дисперсии на определенной длине волны за счет взаимной компенсации материальной и волноводной дисперсии. Известно, что для кварцевых. ОВ минимум затухания соответствует длине волны *1,55 мкм* и при больших скоростях передачи дальность связи на этой длине волны может ограничиваться дисперсией, поэтому для ее снижения осуществляется выбор соответствующего профиля показателя преломления ОВ. Так как хроматическая дисперсия зависит от длины световой волны и, следовательно, от ширины спектра источника оптического излучения, она нормируется в *пс/(нм·км).*

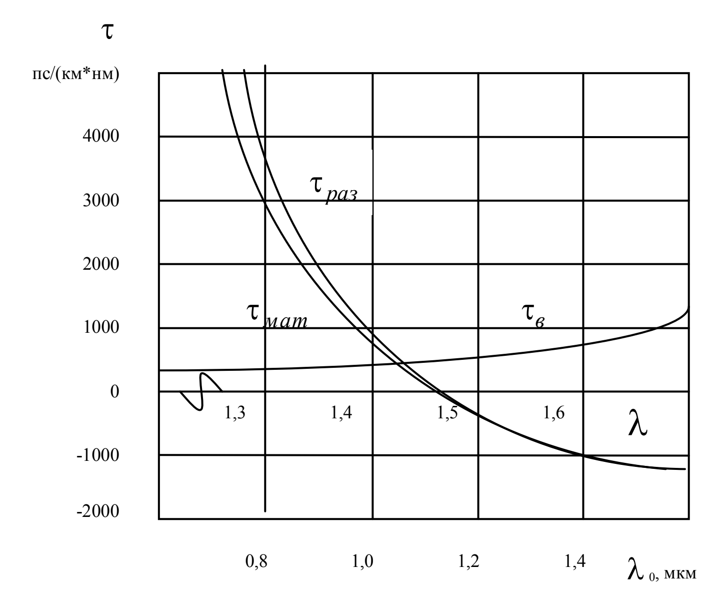


Рис. 14. Зависимость материальной, волноводной результирующей дисперсии от длины волны [7]

В качестве примера на рис. 9 представлены зависимости хроматической дисперсии и ее составляющих от длины волны для различных типов профиля показателя преломления одномодовых ОВ. Как следует из данного рисунка, обычное одномодовое волокно не обеспечивает малой дисперсии для *λ=1,55 мкм,* поэтому были разработаны ОВ со смещенной или сглаженной дисперсией, которые отличаются конфигурацией профиля показателя преломления. В результате исследований волокон со смещенной дисперсией было показано, что наилучшие показатели обеспечивают волокна с треугольным профилем, так как они обладают самофокусирующими свойствами и удерживают распространяющиеся лучи в небольшом объеме, прилегающем к оси ОВ [6].

Так как оптические волокна со смещенной дисперсией обеспечивают минимальную дисперсию только на одной длине волны, это затрудняет применение мультиплексирования для работы на нескольких оптических несущих в окне прозрачности ОВ. Поэтому с целью минимизации дисперсии во всем окне

прозрачности используют волокна со сглаженной дисперсией, которые также выполняются с различными профилями показателей преломления.

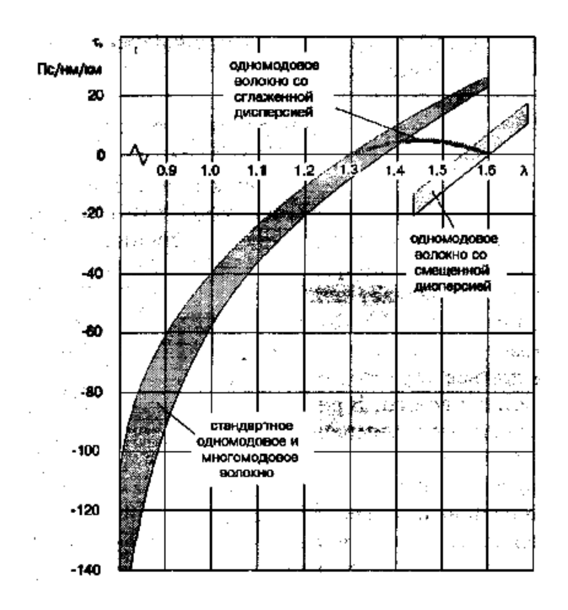


Рис. 15. Зависимость дисперсии от длины волны оптического излучения одномодовых ОВ [6]

Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как D(λ) = M(λ) + N(λ). Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм*км). Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. И здесь важным является то, что при определенной длине волны (примерно 1310 ± 10 нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация M(λ) и B(λ), а результирующая дисперсия D(λ) обращается в ноль. Длина волны, при которой это происходит, называется длиной волны нулевой дисперсии λ_0. Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которых может варьироваться λ_0 для данного конкретного волокна [6].

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией простым соотношением:

$$\tau_{chr}(\lambda) = D(\lambda)\,\Delta\lambda, \qquad (3.10)$$

где $\Delta\lambda$ - ширина спектра излучения источника. К уменьшению хроматической дисперсии ведет использование более когерентных источников излучения, например лазерных передатчиков ($\Delta\lambda$ = 2 нм), и использование рабочей длины волны более близкой к длине волны нулевой дисперсии. В таблице 2 представлены дисперсионные свойства различных оптических волокон.

Существует множество типов профилей показателей преломления одномодовых оптических волокон, которые, помимо требуемой минимизации хроматической дисперсии, обеспечивают также необходимые механические характеристики, минимизацию рэлеевских потерь, технологичность производства и прокладки ОВ и т. д.

Сравнивая различные ОВ по их дисперсионным характеристикам, можно отметить, что лучшими в этом плане являются одномодовые волокна и градиентные волокна с плавным законом изменения показателя преломления, хотя градиентные волокна имеют худшие характеристики по сравнению с одномодовыми.

Рассмотрим, что происходит при учете поляризационной модовой дисперсии. Все происходит точно так же, как и в случае распространения плоской волны в свободном пространстве. Хорошо известно, что плоскую волну всегда можно представить в виде двух ортогонально поляризованных плоских волн. Как и у плоских волн, у поляризационных мод состояние поляризации может быть также любым, однако обычно используют линейно поляризованные моды с индексом 01. Делается это из удобства, так как в волокнах, как правило, преобладает линейное двулучепреломление.

Таблица 2. Дисперсия оптических сигналов в различных оптических волокнах [6]

Тип волокна	λ, нм	Межмодовая дисперсия, пс/км τ_{mod}	Удельная хроматическая дисперсия, пс/(нм км) $D(\lambda)$	Результирующая удельная полоса пропускания, МГц*км,W=0,44/ τ		
				λ =2нм	λ =4нм	λ =35
MMF 50/125	850	414	99,6	958	776	125
	1310	414	1,0	1062	1062	105
	1550	414	19,2	1058	1044	540
MMF 62,5/125	850	973	106,7	441	414	114
	1310	973	4,2	452	452	450
	1550	973	17,3	451	450	384
SF	1310	0	< 1,8	>12000	6100	690
MMF 50/125	1310	0	21,2	10400	5200	594
	155	0	<1,7	10400	6500	740

Показатель преломления у телекоммуникационных волокон хоть и слабо, но зависит от состояния поляризации света, т. е. эти волокна обладают двулучепреломлением, причем в основном линейным. Оно наводится в номинально круглом волокне при его изготовлении из-за неизбежного появления небольшой эллиптичности сердцевины и внутренних напряжений, не обладающих аксиальной симметрией. Так как наведенные в волокне напряжения не имеют выделенного направления, величина и азимут линейного двулучепреломления изменяется случайным образом вдоль оси волокна [8].

Хотя поляризационная анизотропия распределена по длине волокна нерегулярно, однако участок волокна менее длины корреляции нерегулярностей двулучепреломления можно рассматривать как однородный. На этом участке волокно обладает примерно постоянным по величине двулучепреломлением. В нем можно возбудить быструю и медленную поляризационные моды, которые будут распространяться вдоль волокна, не обмениваясь при этом мощностью. Фазовые скорости этих поляризационных мод обратно пропорциональны величине показателей преломления:

$$v_{б} = c / n_{б} \qquad (3.11)$$

и

$$v_{м} = c / n_{м} \,. \qquad (3.12)$$

А разность их фазовых набегов прямо пропорциональна разности показателей преломления и длине участка волокна [8]:

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(L/v_{\grave{i}} - L/v_{\acute{a}}) = (2\pi/\lambda)\Delta n L \,. \qquad (3.13)$$

Если возбудить одновременно обе поляризационные моды, то состояние света будет периодически изменяться вдоль волокна с периодом, равным длине биений. Длина биений находиться из условия, что разность фазовых набегов поляризационных мод равна 2π и выражается через разность показателей преломления:

$$L_{\acute{a}} = \lambda / \Delta n \,. \qquad (3.14)$$

У телекоммуникационных волокон на λ =1550 нм длина биений составляет примерно 5 м, что соответствует разности показателей преломления $\Delta n = 3 \cdot 10^{-7}$.

Двулучепреломление приводит не только к появлению разности фазовых запаздываний поляризационных мод, но и к появлению у них разности групповых запаздываний и, соответственно к уширению импульсов [8]:

$$\Delta\tau(пс) = \delta\tau(пс/км) \times L(км) \,, \qquad (3.15)$$

где $\delta\tau$ -разности групповых запаздываний поляризационных мод на еденице длины волокна. Так как в первом приближении фазовые и групповые скорости поляризационных мод примерно равны друг другу, то с помощью 1 и 2 находим:

$$\delta\tau \approx (1/v_{м} - 1/v_{б}) = \Delta n / c \,. \qquad (3.16)$$

Полагая, что $\Delta n = 3 \cdot 10^{-7}$ и с= 3 10^{5} км/с, получаем оценку $\delta\tau = 1 пс/км$.

В волокнах с регулярным (постоянным по длине волокна) двулучепреломлением можно избежать уширения импульса из-за разности групповых запаздываний. Для этого достаточно, чтобы направление поляризации на входе в такое волокно совпало с направлением оси двулучепреломления волокна. Тогда в волокне возбудится только одна поляризационная мода, и импульс расширяться не будет. Однако длина волокна обычно значительно превышает длину корреляции его неоднородностей. В таком волокне неизбежно возбуждается и вторая поляризационная мода, что и приводит к уширению импульсов [8]

3.3 Измерение дисперсии

Метод измерения межмодовой дисперсии по искажению импульса

В общем случае измерение межмодовой дисперсии сводится к измерению полосы частот многомодового волокна на различных длинах волн (рис. 16).

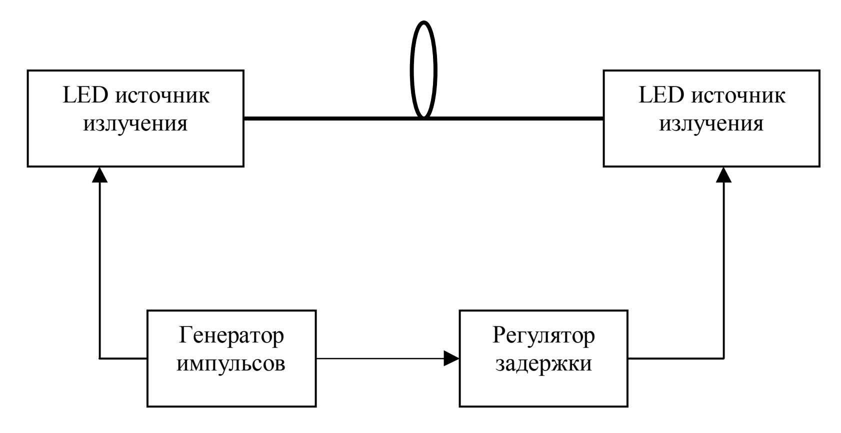


Рис. 16. Схема измерения межмодовой дисперсии многомодового волокна импульсным методом [9]

В соответствии с данной схемой используется перестраиваемый источник оптического излучения, который подсоединяется через модовый скремблер к входу тестируемого волокна, подключенного выходом к входу оптического приемника, который соединен со

стробоскопическим осциллографом и процессором сигналов, предназначенным для устранения помех, фазового дрожания и расчета параметров импульса. Для того чтобы на результаты измерений не оказывала существенного влияния хроматическая дисперсия, спектр источника излучения задается достаточно узким.

В процессе измерения в тестируемом волокне возбуждается импульс излучения заданной длительности, а выходной импульс преобразуется в цифровую форму, включая передний и задний фронт, начиная о 0.01 уровня амплитудного значения. Затем таким же образом измеряется входной импульс, здесь вместо тестируемого волокна используется эталонное волокно, которое представляет собой короткий, в несколько метров, отрезок либо тестируемого волокна, либо волокна, имеющего близкие оптические характеристики. Для того, чтобы минимизировать разницу в задержке распространения излучения в тестируемом и эталонном оптических волокнах, осциллограф и процессор сигналов синхронизируются входным импульсом через регулируемый элемент задержки,

Функция преобразования тестируемого волокна в этом случае имеет вид

$$H(f) = \frac{B(f)}{A(f)}, \tag{3.17}$$

где $B(f)$ и $A(f)$ — преобразования Фурье входного и выходного импульсов, соответственно. Полоса частот волокна определяется как самая низкая частота, для которой $|H(f)| = 0.5$.

Как видно из данной схемы, измерение полосы частот волокна зависит как от условий оптического возбуждения, так И от способа коммутации оптических волокон. Поэтому для обеспечения повторяемости результатов измерений на входе тестируемого волокна должно быть установлено устройство скремблирования, которое задает режим возбуждения большого количества мод. Кроме этого, необходимо позаботиться об устранении распространения мод по оболочке оптического волокна.

Метод измерения межмодовой дисперсии в частотной области

Данный метод измерения полосы пропускания многомодового волокна приведен на рис. 17, где узкополосный оптический сигнал модулируется по амплитуде синусоидальным сигналом генератора

качающейся частоты и вводится черед устройство скремблирования в тестируемое волокно. Модулированные сигналы с входа и выхода ОВ подаются на оптические приемники, которые фиксируют соответствующую оптическую мощность $P_2(f)$ и $P_t(f)$ как функцию частоты модуляции. При этом обычно первыми проводятся измерения с тестируемым волокном, а затем при помощи короткого эталонного волокна определяется входной сигнал. В результате намерений получают амплитудно-частотную характеристику вида:

$$H(f) = \log_{10}\left[\frac{P_2(f)}{P_1(f)}\right], \tag{3.18}$$

откуда полоса пропускания волокна определяется как самая низкая частота, при которой $H(f)$ уменьшается на 3 дБ от значения на нулевой частоте.

Для большего удобства функции источника и приемника могут выполняться с использованием либо анализатора оптического спектра, анализатора электрического спектра с подходящим входным преобразователем. В любом случае задание частоты модуляции и отображение частотной характеристики осуществляется автоматически, однако, когда используется анализатор электрического спектра с внешним лазерным источником и фотоприемником, необходимо проявлять особую осторожность при интерпретации частотной характеристики. Это объясняется тем, что анализатор электрического спектра измеряет мощность по электрическому сигналу фотоприемника, а фотодиод создает ток, пропорциональный оптической мощности, поэтому данный анализатор будет показывать изменение на 6 дБ при изменении оптического уровня на 3 дБ.

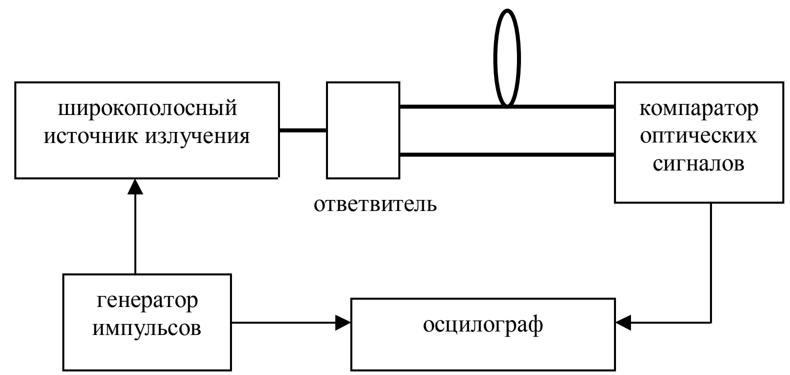


Рис. 17. Схема измерения межмодовой дисперсии многомодового волокна частотным методом [9]

Измерение хроматической дисперсии методом сдвига фаз

Схема измерения хроматической дисперсии по методу сдвига фаз приведена на рис. 18. В соответствии с данной схемой выходной сигнал настраиваемого оптического источника с узкой полосой частот модулируется по интенсивности и подводится к тестируемому волокну, с выхода которого модулированный оптический сигнал поступает на измеритель фазы полученного сигнала относительно модулирующего электрического сигнала, например, векторный вольтметр. При этом измерение фазы повторяется через определенные интервалы по всему требуемому диапазону длины полны с определением групповой задержки по формуле:

$$\tau_\lambda = \frac{\varphi(\lambda)}{2\pi f_0}, \qquad (3.19)$$

где f_0 –рабочая частота, Гц; φ(λ) – измеренный сдвиг фазы, рад.

На основе измеренных значений групповой задержки строится зависимость производной дисперсии от длины волны.

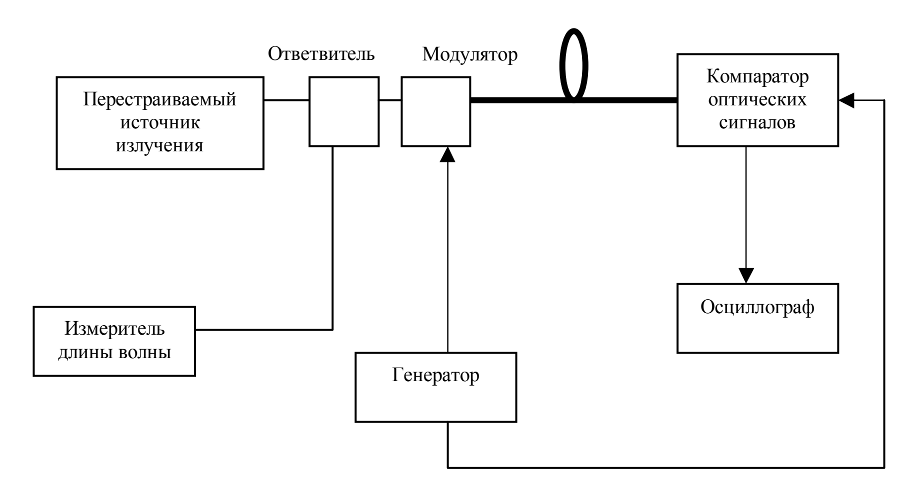


Рис. 13 - Схема измерения дисперсии методом сдвига фаз [9]

Для повышения точности измерения хроматической дисперсии обычно проводится подгонка соответствующей модели к измеренным данным, касающимся относительной групповой задержки, причем уравнение модели выбирается в соответствии с типом измеряемого волокна, Так, для волокна с несмещенной дисперсией, в котором основное влияние оказывает материальная дисперсия, обычно используется трехчленное уравнение Селлмейера [6]

$$\tau(\lambda) = A\lambda^2 + B + C\lambda^{-2} \tag{3.20}$$

Квадратичное уравнение обычно используется для волокна со смещенной дисперсией, в котором доминирующей является волноводная дисперсия и имеет вид:

$$\tau(\lambda) = A\lambda^2 + B\lambda + C \tag{3.21}$$

В некоторых случаях могут применяться другие уравнения, например. пятичленное уравнение Селлмейера

$$\tau(\lambda) = A\lambda^2 + B\lambda + C + D\lambda^{-2} + E\lambda^{-4}. \tag{3.22}$$

Последнее уравнение обеспечивает большую степень свободы, однако оно более чувствительно к воздействию шума и нестабильности измерений.

Точность измерения хроматической дисперсии, естественно, зависит от используемого оборудования. Например, нестабильность фазы и разрешение измерения фазы зависят от частоты модуляции. Поэтому оборудование, предназначенное для измерения фазы, должно однозначно измерять фазу а диапазоне ±180 градусов в широком частотном диапазоне.

Точность длины волны важна вследствие того, что действительное смещение фазы пропорционально заданной длине волны. В зависимости от целей измерения может оказаться достаточной точность установки длины волны перестраиваемого лазера или широкополосного источника, использующего оптический фильтр, равная, например, 0.1 нм. Если необходима более высокая степень точности, как, например, в высокоскоростных системах передачи данных на большие расстояния, обычно используется настраиваемый внешний резонаторный лазер и измеритель длины волны. В этом случае для верного воспроизведения точной структуры кривой относительной групповой задержки измерение устройств с узкой полосой частот, как, например- дифракционная решетка Брэгга и мультиплексоры по длине волны, требуется более высокая разрешающая способность перестраиваемого лазера и точность измерителя длины волны [9].

К существенным ошибкам в измерении могут привести также изменения параметров схемы измерения и тестируемого волокна при изменении температуры окружающей среды. Так, изменение температуры приводит к изменению длины и соответствующему изменению групповой задержки, определяемому, как [9]

$$\Delta\tau = \frac{\Delta L}{L}\tau, \qquad (3.23)$$

где τ- абсолютная групповая задержки по тестируемой линии, L – длина линии, ΔL – изменение длины линии, вызванное температурой. Вследствие того, что метод модуляции со смещенной фазой вначале не выходит за рамки диапазона измерения, изменения групповой задержки, вызываемые изменением температуры, могут накапливаться с течением измерения и искажать конечные результаты. Чтобы минимизировать влияние изменений температуры, необходимо дать некоторое время, для стабилизации тестируемого устройства до начала измерения.

Влияние теплового смещения на оборудование и тестируемое устройство может быть ослаблено путем чередования измерения фазы тестовой длины волны и фиксированной эталонной длины

волны. Изменения фазы эталонной длины волны вызываются только влиянием температуры, и эти данные могут быть использованы для коррекции измерения фазы, проводимого на тестовой длине волны. Использование эталонной длины волны увеличивает точность измерения ценой уменьшения его скорости.

Известен факт, что хроматическая дисперсия изменяет относительную фазу боковых полос пропускания модулированных сигналов. Поэтому в случае использования модулированного по интенсивности сигнала хроматическая дисперсия преобразует амплитудную модуляцию (AM) в частотную модуляцию (FM), а это придает амплитудной модуляции характерную форму, которая может быть проанализирована для определения коэффициента дисперсии на рабочей длине волны. Здесь перестраиваемый лазер с узкой шириной спектра устанавливается на длину волны измерения дисперсии и интенсивно модулируется модулятором Маха-Цендера. По мере изменения частоты модуляции полоса пропускания амплитудной модуляции приобретает серию нулей, которые определяются по формуле

$$f_m = \sqrt{\frac{500c(1+2N)}{D_\lambda L \lambda_0^2}}, \tag{3.24}$$

где N — 0,1,2... — порядковый номер нулевого значения; D, — хроматическая дисперсия, пс/нм-км; L — длина волокна, км; λ_0 — длина волны, нм.

Так, при длине волны, равной 1550 нм, для волокна длиной 20 км с коэффициентом дисперсии 17 пс/нм-км, первый ноль имеет место при 13,55 ГГн, а хроматический дисперсия тестируемого волокна равна

$$D_0 = \frac{500c}{f_m^2 L \lambda_0^2}. \tag{3.25}$$

Как следует из приведенного примера, этот метод лучше всего использовать для измерения относительно больших значений дисперсии, на длине волны, значительно отличающейся от длины волны нулевой дисперсии.

4. Проведение экспериментальных лабораторных работ

4.1. Измерение полных потерь в волоконном световоде

4.1.1. Цель работы

Целью работы является проверка знаний студентов о механизмах затухания оптического излучения в световодах и освоение методик измерения потерь в кварцевых волокнах.

4.1.2 Подготовка к работе

Перед проведением работы должны быть изучены причины появления потерь в кварцевых волокнах, классификация потерь, методы измерения затухания в оптических волокнах.

4.1.3. Описание экспериментальной установки

Блок-схема установки для измерения параметров оптоволокна приведена на рис. 14. В качестве источника и приёмника, соединенных модулем волоконно-оптическим (МВО), используют передатчик МИ-8-3 и приёмник МФ-8-3 устройства сбора аналоговых данных “Электроника МС 8201” соответственно. В качестве входного сигнала используются импульсы от генератора Г-54, и тем самым имитируется прохождение цифрового сигнала по оптоволокну (каналу связи).

Передатчик МИ-8-3 предназначен для преобразования входного сигнала в соответствующие ему по форме оптические импульсы и введения их в МВО. Функциональная схема включает в себя: согласующее устройство (СУ), амплитудный ограничитель (АО), эмиттерный повторитель (ЭП), генератор тока накачки (ГТН), электронно-квантовый преобразователь (ЭКП). СУ необходимо для согласования передатчика МИ-8-3 с базовыми микросхемами

различных серий. АО выполняет функцию ограничителя амплитуды. ЭП необходим как буферный каскад согласования. ГТН служит для вырабатывания тока инжекции и управления ЭКП. ЭКП преобразует ток инжекции в световой поток. МВО предназначен для передачи оптических сигналов с выхода передатчика МИ-8-3 в приёмник МФ-8-3. Конструктивно приёмник и передатчик выполнены в виде законченных блоков с разъёмами для ввода сигналов и питающих напряжений.

Оптический сигнал снимается с квантово-электронного преобразователя, расположенного в приёмнике МФ-8-3, осциллографом (ОСФ). Для электропитания приёмника и передатчика используются источники постоянного напряжения: 5 V для источника излучения и 10 V для приёмника.

Во избежание выхода из строя МИ-8-3 и МФ-8-3 **КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ ИЗМЕНЯТЬ ВЕЛИЧИНЫ ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ**.

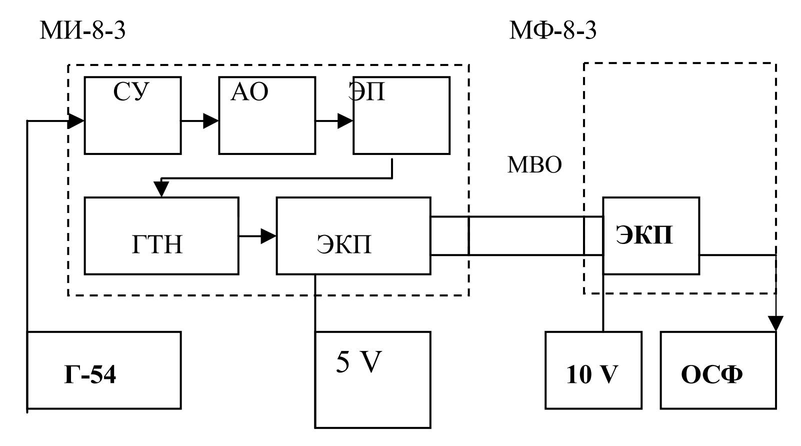


Рис. 14. Блок-схема экспериментальной установки для измерения потерь излучения в волокне

4.1.4. Задание

1. Собрать экспериментальную установку согласно рисунку 9.
2. Получить сигналы на осциллографе для разных волокон.
3. Рассчитать полные потери в волоконном световоде.
4. Составить отчет по работе.

4.1.5 Методические указания к работе

1. Последовательность включения питания.

Отсоединить провода питания блоков МИ-8-3 и МФ-8-3 от источников питания (“общий” провод (белый) можно не отсоединять). Включить оба источника и с помощью вольтметра проверить величины питающих напряжений. При необходимости отрегулировать плавной подстройкой до необходимых величин (см. выше). При выключенном питании подсоединить провода в том же порядке, соблюдая полярность (синий – “минус”, красный – “плюс”). Включить оба источника питания, генератор импульсов и осциллограф.

Для выполнения задания необходимо взять два однотипных оптоволокна разной длины: 0,5 и 300 м.

2. Присоединить длинное волокно к источнику и приёмнику и с помощью резьбы зафиксировать, не прилагая больших усилий (при этом катушку не разматывать). Установить на генераторе частоту импульсов 1 кГц и длительность 30 мкс. Ручками управления на осциллографе добиться устойчивого изображения нескольких импульсов. Записать значение амплитуды сигнала A_1.

3. Присоединить короткое (0,5 м) волокно к источнику и приёмнику и с помощью резьбы зафиксировать (не прилагать больших усилий). Установить на генераторе частоту импульсов 1 кГц и длительность 30 мкс. Ручками управления на осциллографе добиться устойчивого изображения нескольких импульсов. Записать значение амплитуды сигнала A_0.

4. Используя формулу $\alpha = -20 \lg (A_1/ A_0)$ рассчитать затухание в оптоволокне.

4.1.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать блок-схему экспериментальной установки, основные этапы проведения работы, расчетные данные, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные типы потерь в волоконном световоде?
2. Каков механизм потерь в коротковолновой области спектра?

3. Каков механизм потерь в длинноволновой области спектра?
4. В чём основная идея метода «обрыва»?
5. В каких случаях применяют метод «обратного рассеяния»?
6. Что определяет максимальную погрешность измерения затухания в оптическом волокне?

4.2 Измерение потерь в зависимости от изгиба волокна

4.2.1. Цель работы

Целью работы является изучение зависимости потерь в световоде от его изгиба и измерение этой зависимости.

4.2.2. Подготовка к работе

Перед выполнением работы должны быть изучены: определение моды, модовой структуры, классификация потерь в волоконном световоде.

4.2.3. Описание экспериментальной установки

Определение потерь в зависимости от изгиба оптоволокна производится на экспериментальной установке, приведённой на рис. 14. Для выполнения работы необходимо получить у преподавателя измеряемое оптическое волокно.

4.2.4. Задание

1. Измерить потери в оптоволокне при различном радиусе изгиба.
2. Построить зависимость потерь от радиуса изгиба.
3. Определить диаметр сердцевины оптоволокна.
4. Объяснить полученные результаты.

4.2.5. Методические указания к работе

1. Включить питание источника излучения и приёмника согласно 4.1.5, п. 1.

2. Присоединить оптоволокно к источнику и приёмнику. Специальным крепежным устройством закрепить волокно у источника и приемника. Записать значение сигнала A_0.

3. Осторожно создать петлю из волоконно-оптического кабеля и вложить её в углубление наибольшего радиуса (R = 4 см). Записать значение амплитуды сигнала A_1. Используя формулу $\alpha = -20 \lg (A_1/A_0)$, определить потери в волокне.

4. Провести аналогичные измерения потерь, используя углубления меньших радиусов (R=3,2,1 см). Определить потери.

5. Построить зависимость потерь от радиуса изгиба оптоволокна.

6. Используя формулу (8) и взяв значения радиусов 1 и 2 см и соответствующие значения потерь для этих радиусов, определить два значения диаметра сердцевины $a_{1,2}$. Рассчитать среднее арифметическое и определить окончательное значение диаметра сердцевины a.

4.2.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать блок-схему экспериментальной установки, основные этапы проведения работы, расчетные данные, экспериментальный график, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чём физический смысл моды в оптоволокне?

2. Каковы условия многомодовости и одномодовости?

3. Как физически объясняется увеличение потерь при уменьшении радиуса изгиба оптоволокна?

4. О каком явлении в волокне можно судить по полученному в работе графику?

4.3. Определение апертуры оптического волокна

4.3.1. Цель работы

Целью работы является изучение числовой апертуры волокна и ее экспериментальное измерение.

4.3.2. Подготовка к работе

Перед проведением работы должны быть изучены: определение числовой апертуры, методы ее измерения.

4.3.3. Описание экспериментальной установки

Для определения числовой апертуры волокна используется метод “трёх колец”. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 15.

4.3.4. Задание

Измерить числовую апертуру двух оптических волокон

4.3.5. Методические указания к работе

ВНИМАНИЕ!!! Оптическое волокно, используемое в работе, очень хрупкое. **НЕДОПУСТИМО**: изгибать волокна под малыми радиусами, касаться руками или другими предметами торцов световода, ронять волокна на пол и на элементы установки.

1. Смонтировать установку согласно рис. 15. Используемый источник – лампа накаливания (12 вольт), включаемая через блок питания. Система фокусировки – диафрагма и линза (фокусное расстояние – 8 см) на держателе.

2. На оптической скамье установить элементы схемы в следующей последовательности: источник излучения, диафрагма, линза, поворотный стол.

3. Закрепить на поворотном столе короткое волокно так, чтобы конец волокна немного (около 5 мм) выступал за края держателя. Для этого световод необходимо пропустить через отверстие держателя и зафиксировать винтом волокно.

4. На свободный конец волокна надеть специальную пластмассовую втулку и вставить её в одно из крайних отверстий металлической пластины, предварительно просунув волокно через большое отверстие предметного стола микроскопа. Закрепить пластину на предметном столе микроскопа так, чтобы под микроскопом был виден торец волокна. Увеличение микроскопа можно менять с помощью встроенной системы линз.

5. Включить источник питания лампы. Взаимным расположением диафрагмы и линзы добиться фокусировки светового пятна на входном торце световода. Фокусировка считается законченной, если удалось получить световое пятно минимального размера. Для достижения этого необходимо пользоваться ручками смещения поворотного стола, а также возможностью вертикального перемещения диафрагмы и линзы. Ручками горизонтального и вертикального смещения стола совместить риски движущейся части стола с рисками, нанесёнными на линейке фиксированной части стола. Это положение соответствует нахождению торца световода на оси вращения поворотного стола.

6. Установить стрелку поворотного стола на нулевое значение, при этом при хорошей фокусировке под микроскопом должен наблюдаться равномерно засвеченный торец световода. Если этого не происходит, то, значит, либо фокусируемое пятно не попадает на входной торец световода, либо пучок слишком широк (размер сфокусированного пучка и торца световода должны приблизительно совпадать). Важно добиться точной фокусировки. Если это достигнуто, значит, установка готова к работе.

7. Поворачивая стол в одном из направлений, необходимо одновременно смотреть в микроскоп. Поворачивать необходимо малыми приращениями. Из-за несовершенства установки и возможной небольшой неточности фокусировки при повороте торец световода смещается относительного светового пучка. Поэтому необходимо ручками смещения поворотного стола возвращать торец световода под световой пучок (очень малые перемещения),

одновременно наблюдая картину распределения интенсивности на выходном торце волоконного световода. Таким образом, сделав небольшое приращение угла поворота стола, проверить, есть ли необходимость вышеописанной юстировки. При определенном угле поворота под микроскопом должно наблюдаться световое кольцо. Минимальный угол, при котором наблюдается сколько-нибудь различимое кольцо, и есть апертурный угол волокна (угол лежит в пределах $20^0 – 35^0$).

8. Зафиксировать значение угла.

9. Аналогичные операции провести в другом направлении поворота стола. Зафиксировать значение угла.

10. Апертурный угол волокна определить как среднее арифметическое между двумя измерениями.

11. Аккуратно заменить только что использовавшийся световод другим, более длинным, не разматывая его.

12. Измерения проводить аналогичным образом.

13. По окончании измерений сдать преподавателю волокна. Выключить источник питания лампы.

4.3.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать блок-схему экспериментальной установки, основные этапы проведения работы, расчетные данные, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое числовая апертура волокна, апертурный угол?
2. От каких параметров волокна (как ступенчатых, так и градиентных) зависит числовая апертура?
3. Методы измерения апертуры. Их достоинства и недостатки.
4. Суть метода “трёх колец”?
5. Что является источниками ошибок в методе “трёх колец”?
6. Что определяет максимальную погрешность измерения?

4.4. Эмулятор дисперсии оптического волокна

4.4.1. Цель работы

Целью работы является освоение методики измерения дисперсии в оптическом волокне, знакомство с устройством и принципом работы лабораторной установки, а также приобретение навыков применения теоретических знаний для анализа практических результатов.

4.4.2. Подготовка к работе

Перед выполнением работы должны быть изучены физические причины появления дисперсии в световодах, классификация дисперсии, методика измерения ее в волокне, проведен теоретический расчет дисперсии в оптическом волокне.

4.4.3. Описание экспериментальной установки

Рабочая установка (радиотехнический имитатор дисперсии в оптическом волокне) состоит из передающего модуля, трех рабочих модулей, и премного модуля рисунок 16.

Каждый, из трех рабочих модулей, отвечает за определенный тип оптического волокна, источник излучения, длину линии, а также за режим работы.

Выбор длины линии связи, а также источника излучения, происходит с помощью переключателя «Длина оптического волокна» и тумблера «Тип источника» в нужное для работы положение. Переключатель «Рабочий модуль» управляет с какого модуля снимается импульс после прохождения линии связи. С разъёма «выход» импульс передается на вход осциллографа.

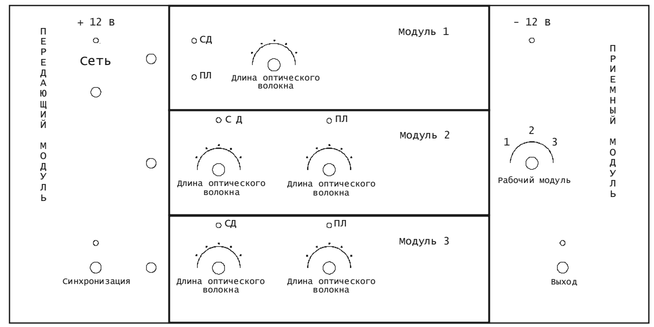


Рис. 16. Лабораторная установка «Эмулятор дисперсии оптического волокна»

4.4.4. Задание

1. Измерить длительность импульса, прошедшего оптическое волокно различной длины, и определить средние значения дисперсии оптического волокна каждого модуля установки.

2. По значениям дисперсии и её зависимости от типа источника света определить тип оптического волокна.

3. Сравнить теоретические (рассчитанные) и полученные в результате измерения значения дисперсии.

4. Сделать выводы по работе.

4.4.5 Методические указания к работе

Необходимо придерживаться следующего порядка проведения работы.

- Перед проведением измерений необходимо подсоединить к разъему «Выход», на установке, осциллограф.
- Тумблером «Сеть» включить установку.
- Переключателем «Рабочий модуль» выбрать режим работы (1).
- Тумблером «Тип источника» выбрать источник света (светодиод (СД) или полупроводниковый лазер (ПЛ)).
- Установить с помощью переключателя «Длина оптического волокна» (на модуле 1) первое положение (длина линии связи равна 10 метрам).

- С помощью использования выхода «Синхронизация» с Передающего модуля добиться четкого изображения выходного импульса гауссовой формы на осциллографе..

- Провести измерение длительность импульса на уровне половины от его амплитуды ($\tau_{вх}$).

- Провести измерение длительность импульса на уровне половины от его амплитуды для других положений переключателя «Длина оптического волокна» (на модуле 1) ($\tau_{вых}$).

- Определить величину дисперсии по формуле: $\tau=(\tau_{вых}{}^2 – \tau_{вх}{}^2)^{1/2}$ (значения τ должны быть приведены на 1км.).

- Провести измерения длительности импульса для лазера и светодиода.

- Переключатель «Рабочий модуль» установить в положение 2.

- Провести подобные измерения для лазера и светодиода с использованием переключателей модуля 2.

- - Переключатель «Рабочий модуль» установить в положение 3.

- Провести подобные измерения для лазера и светодиода с использованием переключателей модуля 3.

4.4.6 Содержание отчета

Отчет должен содержать блок-схему экспериментальной установки, теоретические расчеты, экспериментальные данные (оформленные в виде таблицы), выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Понятие показателя преломления в оптике?
2. Понятие дисперсии оптического волокна?
3. Понятие длины волны нулевой дисперсии?
4. Чем определяется коэффициент дисперсии?
5. Виды дисперсии?
6. Дисперсионные свойства одномодовых и многомодовых оптических волокон?
7. Оптические волокна со смещенной дисперсией (достоинства и недостатки).
8. В чем заключается метод измерения дисперсии в частотной области?
9. Способы компенсации полной дисперсии в линии передачи?

Литература

1. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / Сб. статей под ред. Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н. М.: Техносфера, 2010. 608 с.

2. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи: Учебное пособие для вузов. –М.: Горячая линия. Телеком, 2007. – 464 с.

3. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков В.Н. Оптические волокна для линий связи. М.:Лесарарт, 2003,208 с.

4. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. С. 33–35, 77–78, 80–81.

5. Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов/ В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов . под ред В. Н. Гордиенко. – М: Горячая линия – Телеком.2011. – 368 с.

6. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендс, 2001, 267 с

7. Котюк А.Ф., Курчатов Ю.А., Майборода Ю.П. и др. Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем.- Москва: Радио и связь, 1987. – 224с.

8. Кемельбеков В.А., Мышкин В.Ф., Хан В.А. Оптические кабели связи. - Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 352 с.

9. Горлов Н.И., Микиденко А.И., Минина Е.А. Оптические линии связи и оптические компоненты ВОСП. Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2003. – 231 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Поляризационные эффекты в оптических волокнах

Так как свет представляет собой электромагнитную волну, а ее распространение в любой среде описывается уравнениями Максвелла, распространение света может рассматриваться путем определения развития связанных с ним векторов электрического $\vec{E}(r,t)$ и магнитного $\vec{H}(r,t)$ полей в пространстве и времени [4]. Здесь r обозначает пространственное положение вектора. Более удобно оперировать с преобразованием Фурье этих векторов. Преобразование Фурье для $\vec{H}(r,t)$ определяется аналогичным образом.

Поскольку электроны в атоме заряжены отрицательно, а ядро несет положительный заряд, то при действии электрического поля на материал, подобный кварцу, происходит поляризация атомов. Индуцированная поляризация описывается вектором $\vec{P}$, зависящим от особенностей среды и прилагаемого электрического поля и связанным с вектором $\vec{E}(r,t)$ и электрической индукцией $\vec{D}$ выражением:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \qquad (A.1)$$

Связь $\vec{P}$ и $\vec{E}$ в оптическом волокне определяется свойствами среды и является причиной важного явления – дисперсии.

Рассмотрим поведение фундаментальной моды, представив электрическое поле $\widetilde{E}(r,t)$ световой волны в виде:

$$\widetilde{E}(r,t) = \widetilde{E}_x \vec{e}_x + \widetilde{E}_y \vec{e}_y + \widetilde{E}_z \vec{e}_z, \qquad (A.2)$$

где $\vec{e}_x$, $\vec{e}_y$ и $\vec{e}_z$ - соответственно единичные векторы, причем z – направление распространения света. Данное уравнение имеет два линейно независимых решения, которые соответствуют фундаментальной моде.

Изменяющееся со временем электрическое поле считается линейно поляризованным, если его направление остается постоянным (не зависит от времени). Если электрическое поле,

ассоциируемое с электромагнитной волной, не имеет продольной компоненты, поле считается поперечным, в противном случае – продольным. Учитывая это, два линейно независимых решения волнового уравнения представляют линейно поляризованные вдоль осей *x* и *y* электрические поля, которые в силу взаимной перпендикулярности называются ортогонально поляризованными составляющими электрического поля или состояниями поляризации SOP (State of Polarization). Любая линейная комбинация этих двух линейно поляризованных составляющих также является решением уравнения и, таким образом, фундаментальной модой. В идеальном изотропном оптическом волокне оба состояния поляризации имеют одну и ту же постоянную распространения, т.е. распространяются с одинаковой скоростью, и в результате прохождения такой среды длительность результирующего импульса остается неизменной. Но в реальных оптических волокнах из-за нарушения круговой симметрии возникает небольшая анизотропия, поэтому, учитывая, что световая энергия распределена между SOP, различие констант распространения вызывает увеличение длительности импульса на выходе ОВ.

Анизотропия или двулучепреломление оптического волокна может быть связано либо с нарушением идеальной круговой формы сердцевины, либо с наведенным двулучепреломлением вещества, например, из-за несимметричных напряжений в материале ОВ как это показано на рис. А.1, или из-за несовпадения геометрических центров сердцевины и оболочки.

Потеря круговой симметрии приводит к появлению анизотропии, при этом, в оптическом волокне распространяются две ортогонально поляризованные моды с различными фазовыми и групповыми скоростями.

Скорости распространения поляризационных компонентов светового импульса различны, что приводит к возникновению временной задержки $\delta\tau$, которую принято называть дифференциальной групповой задержкой DGD (Differential Group Delay), приводящей к уширению результирующего сигнала. Состояния поляризации, задающие самое быстрое и самое медленное распространение сигнала, называются быстрым и медленным главными состояниями поляризации PSP (Principal State of Polarization). Оси линейных поляризаций быстрого и медленного PSP называются «быстрой» и «медленной» осями анизотропной среды. Различие скоростей приводит к отставанию импульса, поляризованного вдоль медленной оси PSP (рис. А.2) от импульса,

поляризованного вдоль быстрой оси PSP на величину относительной задержки $\delta\tau$.

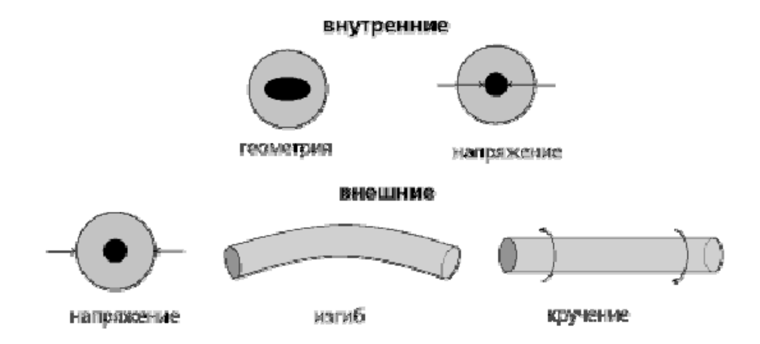


Рис. А.1. Причины возникновения анизотропии оптического волокна

Возникновение DGD вызывает ряд искажений информационного сигнала, включая увеличение длительности импульса. Но в отличие от хроматической дисперсии, PMD не является стабильной, а имеет статистическую природу. Существует несколько факторов роста анизотропии профиля волокна:

статические факторы:

- собственно несовершенство заводского процесса вытяжки волокон;
- скрутка волокон при изготовлении волоконно-оптического кабеля (ВОК);
- изгибы ВОК и как следствие механические деформации волокон, возникающие в процессе укладки кабеля;

и динамические факторы:

- вариации температуры окружающей среды – для ВОК, проложенных в грунт;
- динамические деформации волокон (ветровые нагрузки, вариации температуры окружающей среды, деформации вследствие оледенения кабеля) – для подвесных ВОК.

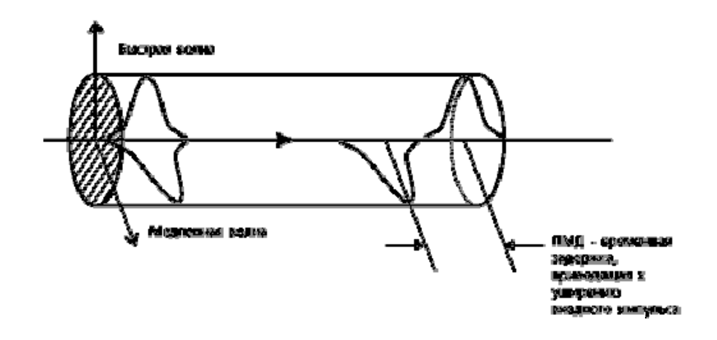


Рис. А.2. Появление PMD при распространении световых импульсов в оптическом волокне [6]

Из-за наличия динамических факторов даже в пределах отдельного сегмента волокна невозможно определить направление поляризации сигнала после прохождения этого сегмента. Тем более, невозможно определить пропорцию, в которой распределиться энергия между PSP на следующем участке волокна. Итак, дифференциальная групповая задержка $\delta\tau$ не постоянная величина, а изменяется со временем, причем случайным образом. Детальный анализ динамического поведения DGD показывает, что эта случайная величина наилучшим образом подпадает под распределение Максвелла, а среднеквадратичное отклонение $\left\langle \delta\tau^2 \right\rangle$ связано со средним значением дифференциальной групповой задержки соотношением [6]:

$$\left\langle \delta\tau^2 \right\rangle = \frac{3\pi}{8} \left\langle \delta\tau \right\rangle_{Max}^2, \tag{А.3}$$

где индекс *Max* – обозначает усреднение по функции распределения Максвелла.

Поляризационной модовой дисперсией PMD называют среднеквадратичное значение дифференциальной групповой задержки:

$$\tau_{PMD} = \sqrt{\left\langle \delta\tau^2 \right\rangle}. \tag{А.4}$$

В линии с большим числом сегментов значение PMD определяется в зависимости от суммарного расстояния по формуле [6]:

$$\tau_{PMD} = D_{PMD}\sqrt{L},\qquad (А.5)$$

где L - протяженность оптической линии связи (км), D_{PMD} - коэффициент PMD оптического волокна (пс/км$^{1/2}$).

Значение коэффициента D_{PMD} для типичных ОВ находится в пределах от 0,1 до 2 пс/км$^{1/2}$. В таблице 1 для них при разных скоростях цифровой передачи приведены значения максимальной протяженности линии связи.

Таблица А.1. Значения максимальной протяженности волоконно-оптической линии связи

	D_{PMD} (пс/км$^{1/2}$)	0,1	0,5	2,0
B=2,5Гбит/с	L (км)	160 000	6 400	400
B=10Гбит/с	L (км)	10 000	400	25
B=40Гбит/с	L (км)	625	25	1,56

Задержка световой волны, поляризованной вдоль медленной оси, относительно волны, поляризованной вдоль быстрой оси, приводит к появлению разности фаз $\Delta\varphi$ между двумя поляризационными компонентами, прямо пропорциональной DGD $\delta\tau$ и угловой частоте ω световой волны:

$$\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_f = \omega\Delta\tau.\qquad (А.6)$$

Линейная зависимость разности фаз двух поляризационных компонент приводит к периодической зависимости поляризации выходного излучения от частоты.

Издание вышло в свет в авторской редакции

Отпечатано на участке оперативной полиграфии
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 85 от «11» декабря 2013 г. Тираж 100 экз.